

THESES
présentée à
LA FACULTE DES SCIENCES DE PARIS
pour l'obtention du titre
de DOCTEUR de l'UNIVERSITE
de PARIS
(mention Sciences)

par M. **Mehmet İrfan SAYGILI**

Ingénieur de la Faculté de Mécanique de l'Université Technique d'ISTANBUL

Sujet de la 1ère Thèse **ETUDES DE LA CHUTE LIBRE DES GRAINS
DE BLE ISOLES OU EN ESSAIM EN VUE DU TRIAGE DES GRAINS DE SEMENCE**

Sujet de la 2è Thèse **TRANSMISSION HYDROSTATIQUE
ET RELEVAGE HYDRAULIQUE APPLIQUES AUX TRACTEURS ET MACHINES AGRICOLES**

Soutenues le **12 JUIN 1969** devant la Commission

composée de : Président — Monsieur le Professeur **A. FORTIER**

Examineurs { Monsieur le Professeur **R. COMOLET**
Monsieur le Professeur **J. BRICARD**

Invité — Monsieur l'Ingénieur en Chef du G.R.E.F. **C. JOUIN**



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552220_0042

Ce travail a été effectué au CENTRE NATIONAL D'ETUDES ET D' EXPERIMENTATION DE MACHINISME AGRICOLE, sous la direction de Monsieur le Professeur R. COMOLET, que je remercie très respectueusement. Son autorité clairvoyante m'a permis de surmonter bien des difficultés.

Je tiens à remercier également Monsieur le Professeur A. FORTIER, qui a bien voulu accepter de présider le jury d'examen et Monsieur le Professeur J. BRICARD, qui a aimablement consenti d'en faire partie.

Mes plus vifs remerciements et sentiments de gratitude vont aux responsables des Services " EXPERIMENTATION " et " ELECTRONIQUE " du C.N.E.E.M.A. qui ont bien voulu mettre à ma disposition tout le matériel de mesure nécessaire et m'ont apporté leur concours technique. Que Monsieur L. BOURNAS, Directeur Technique du CNEEMA; Monsieur Cl. JOUIN, Ingénieur en chef du GREF; Monsieur JN. MATTEI, Ingénieur du GREF ; Monsieur A. GORMEZANO, Electronicien, ainsi que tout le personnel scientifique du C.N.E.E.M.A. trouvent ici l'expression de ma reconnaissance pour leur précieuse collaboration qui m'a permis l'accomplissement de ce travail.



UNIVERSITE DE PARIS

FACULTE DES SCIENCES DE PARIS

PROFESSEURS

JANVIER 1967

Le Doyen M. ZAMANSKY

GRASSE	T Evolution des êtres organisés	Mle CAUCHOIS	T Chimie Physique
PREVOST	T Chimie organique	THELLIER	T Physique du Globe
WYART	T Minéralogie et cristallographie	PONCIN	T Mécanique générale
TEISSIER	T Zoologie	DUBREIL	T Arithmétique et Théorie des nombres
AUGER	T Physique quantitative et relativité		
MONNIER	T Physiologie générale		
PIVETEAU	T Paléontologie	GAGNIARD	T Géophysique appliquée
ROCARD	T Physique ENS	CHAMPETIER	T Chimie macromoléculaire
CARTAN	T Mathématiques ENS	CUVILLIER	T Micropaléontologie
LAFFITTE	T Chimie générale		
N	T Géométrie supérieure	TRILLAT	Microscopie et diffraction électronique
COULOMB	T Physique du globe	WIEMANN	T Chimie organique et structurale
CHRETIEN	T Chimie minérale	DESTOUCHES	T Théorie physique
BOCQUET	T Zoologie	AMIEL	T Chimie générale
KASTLER	T Physique ENS		
EPHRUSSI	T Génétique	JP. MATHIEU	T Physique optique
GAUTHERET	T Biologie végétale CPEM	COUTEAUX	T Cytologie
LUCAS R.	Recherches physiques	CHOQUET	T Théorie des fonctions et topologie
THOMAS A.	T Biologie	FELDMANN	T Biologie végétale marine
MORAND	T Physique enseignement	JOST	T Physiologie comparée
SOLEILLET	T Physique CPEM	FORTET	T Calcul des probabilités et physique mathématiques
FORTIER	T Mécanique expérimentale des fluides	SCHWARTZ	T Calcul différentiel et intégral
DRACH	T Biologie maritime	CHOUARD	T Physiologie végétale
QUENEY	T Météorologie et dynamique de l'atmosphère	MALAVARD	T Aviation (technique aéronotique)
GALLIEN	T Embryologie	BRELOT	T Analyse supérieure
EICHHORN	T Botanique	NORMANT	T Synthèse organique
		YVON	T Théories physiques

BENARD	T Chimie appliquée	COTTE	T Physique électricité
DUGUE	T Statistique mathématique	DUBOIS JE.	T Chimie organique physique
SOULAIRAC	T Psychophysiologie	LAMOTTE	T Zoologie ENS
ULRICH	T Physiologie végétale appliquée	ap-OLMER	T Energétique générale
KIRRMANN	T Théories chimiques	GAUTHIER	T Mécanique appliquée
CHADEFAUD	T Botanique	BARCHEWITZ	T Chimie physique
Mle LE BRETON	T Physiologie de la nutrition	BROSSEL	T Physique atomique
LELONG	T Application de l'analyse à la géométrie	BUSER	T Physiologie comparée
DEVILLERS	T Anatomie comparée	CAMUS	T Physiologie végétale
EHRESMANN	T Topologie algébrique	CURIEN	T Minéralogie et cristallographie
		POSSOMPES	T Zoologie
FRANÇON	T Physique SPCN	PULLMANN	T Chimie quantique
GLANGEAUD	T Géographie physique, géologie dynamique	TEILLAC	T Physique nucléaire et radioactivité
GODEMENT	T Mathématiques MGP	VILLE	T Econométrie
PISOT	T Technique mathématiques de la physique		
ROCH	T Géologie	FREYMANN	T Recherches physiques
SCHATZMANN	T Astrophysique	ROLLET	T Chimie minérale
TERMIER	T Géologie générale	Mle JOSIEN	T Chimie SPCN
ZAMANSKY	T Mathématiques générales	CHEVALLEY	T Géométrie algébriques et théorie des groupes
LENNUIER	T Physique MGP	GERMAIN	T Mécan. Théo. des fluides
ROUTHIER	T Géologie appliquée	LUCAS G.	T Géologie
Mme TONNELAT	T Physique théorique	ALLARD	T Chimie physique
DIXMIER	T Mathématiques MPC	BERTHELOT	T Physique des particules fondamentales
SOUCHAY	T Chimie générale	BRICARD	T Météorologie
AIGRAIN	T Electrotechnique	Mme ALBE-FESSARD	T Psycho-physiologie
BRUSSET	T Chimie systématique		
LEVY	T Physique théorique des hautes énergies	M. JULIA	T Etude des molécules naturelles complexes
Mme CHAIX	T Chimie biologique	MAGAT	T Physico-chimie des rayonnements
Mme HUREL	PY T Biologie végétale CPEM		
PANNETIER	T Chimie générale I	MONOD	T Chimie du métabolisme
BRUN	T Mécanique des fluides I	DE POSSEL	T Analyse numérique
Mme DURBEIL	T Mathématiques (agrégation)	CHARLOT	T Chimie analytique

Mme LELONG	T Mathématiques II ENS	CHATELET	T Chimie CPEM
BELLAIR	T Géologie SPCN	MATTLER	T Physique SPCN
BOUISSIÈRES	T Radiochimie	AUBOUIN	T Géologie
Mme COUTURE	T Thermodynamique et mécanique	Mme BENOIT-GUEUTAL	T Physique nucléaire et radioactivité
FRANC	BIOLOGIE animale CPEM	BOUGIS	Biologie végétale marine Villefranche s/mer
SCHNELL	T Botanique tropicale		
STOLKOWSKI	T Physiologie générale	RIGAUDY	T Chimie SPCN
ACHER	T Chimie biologique	COLLONGUES	T Chimie appliquée
BAUDOIN	T Biologie animale CPEM	DUBERT	Biochimie
BEAUMONT	Biologie animale CPEM	NOZIERES	T Physique fondamentale
BLAMONT	Géophysique inosphère	CADIOT	Chimie organique
BOUREAU	T Botanique	IVANOFF	T Océanographie physique
CURIE D.	Physique MGP	FRANÇOIS	Zoologie
DURAND DELGA	T Géologie	TALBOT	Génie chimique
HELLER	T Physiologie végétale	Mme NOUGAREDE	Botanique
TORTRAT	T Calcul des probabilités	BRUHAT	T Mathématiques MPC
CAILLEUX	T Géologie SPCN	FOURNET	Electricité générale
MAIGNAN	T Physique électricité	DEHEUVELS	T Mathématiques propédeutique
DAUDEL	T Mécanique ondulatoire	FURON	T Géologie SPCN
Mme CHOQUET	T Mécanique analytique et mécanique céleste	Mme GANS	T Génétique
BRUHAT		GENEVES	Biologie végétale CPEM
		HUPE	T Pétrographie
Mle VEIL	T Physiologie générale	HOLLANDE	T Biologie générale
IWOFF	T Microbiologie	LIONS	T Analyse numérique
SIESTRUNCK	T Mécan. Phys. et expér.	MAITTE	T Chimie organique
CABANNES	T Mécanique théorique	NICOLAS	Géologie appliquée
CAIRE	T Géographie physique et géologie dynamique	PANIGEL	Biologie général
		RAVIER	T Pétrographie
COMOLET	T Mécanique des fluides	MOREL F	T Physiologie comparée
DELLOUE	T Physique de l'exosphère	ROSEAU	T Mécanique théorique des fluides
HOUILLON	T Biologie animale	ROUBINE	T Electronique ESE
OLIVIER	T Anthropologie	SILBER	T Chimie CPEM
SAMUEL	T Mathématiques (ENS Jeunes filles)	UEBERSFELD	T Electronique
THIRY	T Mécanique céleste	HERVE	T Mathématiques
ABELES	T Physique SPCN	Mme PECKER-	T Astrophysiques
AMAT	T Thermodynamique	WIMEL	

BALKANSKI	Physique MPC 1	TAVERNIER	Physique PC
LE CORRE	T Electricité	DURAND Michel	Biologie animale SPCN
NATAF	T Physique nucléaire et radioactivité	PASCAUD	Physiologie
ECHALIER	Biologie animale CPEM	Mme PETIT	Biologie animale CPEM
BARRAUD	T Physique CPEM	CAGNAC	Electricité
DARS	Géologie structurale et appliquée	FALK-VAIRANT	Physique nucléaire
CAMEFORT	Botanique (agrégation)	KRASNER	T Mathématiques
VICHNIEWXKY	T Mécanique industrielle	BENZECRI	T Statistiques
SIGWALT	Chimie SPCN	CINH MAU	Physique MGP
BLAQUIERE	Automatique	DUQUESNES	Physique CPEM
BARUCH	Physique propédeutique	SCHTZENBERGER	T Programmation
ARNOUS	T Physique théorique	TREMILLON	Chimie MPC
SLONINSKI	Génétique	FAYARD	Chimie MPC
MALLIAVIN	T Mathématiques propédeutique	BUVET	Chimie CPEM
GAUDEMAR	Chimie propédeutique	AUTHIER	Minéralogie et cristallographie
BROUSSE	T Mécanique théorique	BONNEFILLE	Electrotechnique
ROSCH	T Astronomie	Mme PUISEUX DAO	Biologie végétale
BUY	T Physique expérimentale	BERGER	T Géométrie supérieure
LAZARD	T Mathématiques MPC	Mle LIBERMANN	T Mathématiques
MOREL P.	Physique MPC	DEDONDER	T Biologie cellulaire
ARSAC	Programmation	DUFOUR	T Electronique IUT
LEFEBVRE	T Chimie MPC	SCHAAL	Chimie CPEM
ROK	Physique fondamentale	BAUCHOT	Anatomie comparée
CHAPEVILLE	Biochimie	LANCE	BV CPEM
BENOIT	Physique CPEM	GIRAUD	Botanique ENS
RIO	Chimie CPEM	HULIN	Physique PC
JAUZEIN	Géologie ENS	VIGIER	Génétique
PREVOST F.	Biologie cellulaire	GUERN	Biologie végétale
AVARD P.	Biologie animale CPEM	SLODZIAN	Physique CPEM
Mme CHARNIAUX-	Evolution des êtres organisés	LACOMBE	Logique mathématique
COTTON	Chimie CPEM	TAVLITZKI	Biologie cellulaire
Mle FICINI	Astronomie	ARVIEU	Physique CPEM
LEQUEUX	Physique atomique	TAXI	B.A. CPEM
COHEN		COLLENOT	B.A. CPEM
ANNOUDJI		BASSELIER	Chimie propédeutique
		BADOUAL	Electronique IUT

Le Secrétaire Général,

R. POUILLAIN

SOMMAIRE

ooo

	<i>Pages</i>
A.- Enoncé du problème	1
I.- Introduction	1
II. Etat de la question	1
III. Procédés utilisant un courant d'air	7
1. Procédé de flottation	7
2. Action d'un courant d'air sur un grain isolé	9
3. Analyse du procédé de flottation	9
4. Procédé de modèle	11
IV. Procédé de chute libre	12
V. Rappel de travaux antérieurs	16
 B.- Méthode de mesure	 28
I. Description de l'installation.	28
II. Mise au point du système de mesure	31
III. Précisions sur le fonctionnement du système	38
 C.- Expérimentation	 41
I. Essais avec des billes de nylon isolées	41
II. Calcul théorique de la durée de passage	42
III. Essais avec des grains isolés	48
1. Echantillonnage	48
2. Mesures et calculs	51
IV. Essais en essaim	59
1. Mise au point d'un système de lâchage des grains en essaim	 59
2. Essais préliminaires avec des billes de nylon	61
3. Essais avec des grains de blé en essaim	68
 D.- Appareils utilisés	 74
 E.- Conclusions	 83
 BIBLIOGRAPHIE	 84

ETUDES DE LA CHUTE LIBRE DES GRAINS DE BLE,
ISOLES OU EN ESSAI EN VUE DU TRIAGE
DES GRAINS DE SEMENCE.

-000-

A.- ENONCE DU PROBLEME

I.- INTRODUCTION -

Le triage des impuretés des semences est un important problème agricole. En effet, si la séparation n'est pas bien faite, des graines étrangères seront semées, empêcheront le bon développement des graines alimentaires et elles se présenteront lors de la moisson dans le même rapport de productivité que la graine principale si ce n'est dans un rapport supérieur. Les produits élaborés à partir de cette récolte ne pourront pas être de bonne qualité, et si l'on essaie de la purifier convenablement il en coûtera un travail cher et pénible.

Actuellement, le triage commence dans les moissonneuses-batteuses dans le champ et il se continue ensuite dans les appareils nettoyeurs opérant par cribles à secousses et par courant d'air. Dans ce dernier cas, il est important de connaître les propriétés aérodynamiques de ces graines pour construire les appareils de triage basés sur ce principe. Malgré les études relatives à la possibilité du triage par courant d'air qui ont débuté dès 1925, et malgré l'utilisation d'autres méthodes, le problème demeure encore posé à l'heure actuelle, et est une préoccupation des instituts de recherches et des organismes agricoles.

II.- ETAT DE LA QUESTION

Tout mouvement relatif d'un corps solide et d'un milieu liquide ou gazeux provoque l'apparition d'un système de forces exercées sur ce solide. Ce système de forces suivant les principes de la mécanique peut être ramené à la force résultante F , et au moment résultant M . Si l'on situe de façon arbitraire dans le corps solide des axes de coordonnées rectangulaires (X, Y, Z) il est facile de décomposer la force et le moment en trois composantes :

$$F_x, F_y, F_z \quad \text{et,}$$

$$M_x, M_y, M_z$$

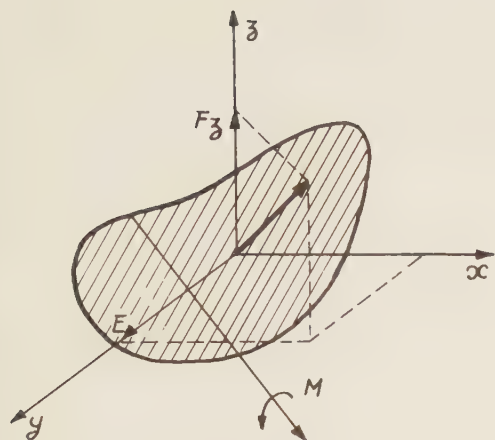


Fig. 1

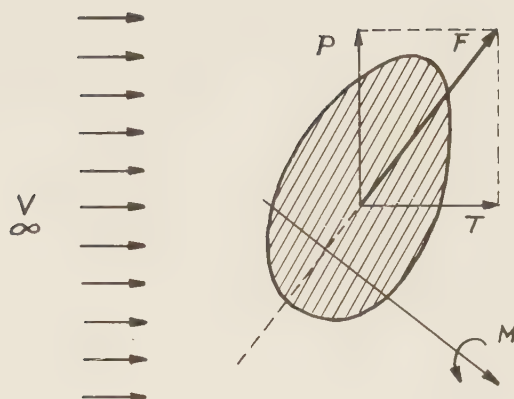


Fig. 2

Les lois générales de la dynamique nous enseignent qu'il n'y a pas de différence entre l'étude du mouvement d'un fluide animé de la vitesse uniforme V à l'infini et venant s'écouler autour d'un corps immobile et celle du mouvement de ce même corps à la même vitesse uniforme V dans le fluide au repos. En réalité ces deux phénomènes ne sont pas identiques en raison de la difficulté de réalisation d'un courant fluide de vitesse rigoureusement uniforme et de l'intervention de la turbulence dans le cas où le fluide est mobile (Paradoxe de du Buat). Supposons le corps complètement immergé,

le fluide indéfini et de vitesse uniforme et invariable loin en amont de l'obstacle. Si on considère des obstacles semblables géométriquement, l'analyse dimensionnelle nous conduit à écrire que toute force F doit être de la forme :

$$F = \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot l^2 \cdot f(\alpha_i) \quad (1)$$

où $\alpha_i = 1, 2, 3$, sont des

coefficients sans dimensions caractérisant le mouvement relatif entre le corps solide et le fluide ainsi que la forme du corps et son orientation.

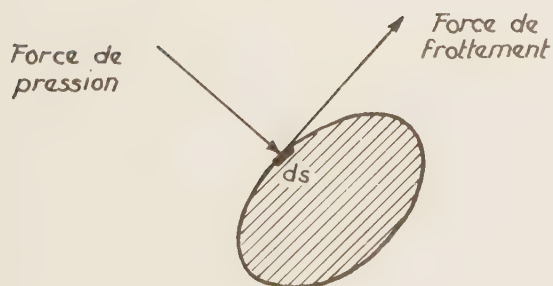


Fig. 3

En dernière analyse ces forces sont : les forces de pression qui agissent normalement sur un élément de surface dS et les forces de frottement dues à la viscosité du fluide. Etant donné que la fonction $f(\alpha_1)$ ne se compose que de coefficients sans dimensions les composantes peuvent s'exprimer aussi sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} C_x \rho S V_\infty^2 \\ P &= \frac{1}{2} C_z \rho S V_\infty^2 \\ M &= \frac{1}{2} C_m \rho S V_\infty^2 L \end{aligned} \quad (2)$$

dans lesquelles :

T : Composante parallèle à $\vec{V}_\infty$ de la résultante F des forces exercées par le fluide sur le corps, résultante qui s'appelle la trainée,

P : Composante perpendiculaire à $\vec{V}_\infty$ de la résultante F , résultante qui s'appelle la portance,

M : Moment résultant des forces exercées par le fluide sur le corps,

ρ : Masse spécifique du fluide,

S : Produit de deux dimensions linéaires choisies conventionnellement sur le corps solide ; surface caractéristique du corps
Par exemple : le maître couple de l'obstacle ; quantité homogène à ℓ^2 , etc ...

ℓ : Une dimension linéaire caractéristique du corps solide,

C_x : Coefficient de trainée sans dimension,

C_z : Coefficient de portance sans dimension,

C_m : Coefficient de moment sans dimension,

L : Distance entre la droite support de la force F et le centre de gravité du solide,

$\frac{1}{2}$: Coefficient habituellement utilisé en hydrodynamique.

Si nous connaissons la valeur des coefficients C_x , C_z et C_m l'action du fluide sur le corps est parfaitement définie. On sait que ces coefficients sont excessivement complexes et que, mis à part, quelques cas très simples, ils ne se prêtent pas du tout au calcul théorique. C'est pourquoi, leur étude se fait par la voie expérimentale.

Dans le cas où le corps se déplace dans le fluide au repos, il faut connaître en outre l'orientation du corps pour pouvoir déterminer la valeur S , sauf dans le cas exceptionnel où S est une constante géométrique indépendante de l'orientation par exemple dans le cas du corps géométrique.

Ces trois coefficients dépendent avant tout de la forme du corps et de son orientation par rapport à la vitesse V du fluide. Si nous utilisons les notations aérodynamiques pour les fluides compressibles C_x , C_y , C_m , sont en général fonction de cinq nombres fondamentaux sans dimension :

$$C_x = f_1 (Re, F, M, P, \gamma)$$

$$C_z = f_2 (Re, F, M, P, \gamma) \quad (3)$$

$$C_m = f_3 (Re, F, M, P, \gamma)$$

$$\text{Nombre de Reynolds : } Re = \frac{V \cdot l}{\nu}$$

$$\text{Nombre de Froude : } F = \frac{l \cdot g}{V^2}$$

$$\text{Nombre de Mach : } M = \frac{V}{a}$$

$$\text{Nombre de Prandtl : } P = \frac{\nu}{\lambda / \rho \cdot Cp}$$

$$\text{Rapport des chaleurs massiques : } \gamma = \frac{Cp}{Cv}$$

Pour l'expression de ces nombres : les notations sont les suivantes :

g : accélération de la pesanteur,

a : célérité de la propagation du son dans le fluide où se déplace le corps solide,

ν : coefficient de viscosité cinématique ($\frac{\mu}{\rho}$)

λ : coefficient de conductibilité thermique du fluide, supposé constant,

C_p : chaleur massique à pression constante,

C_v : chaleur massique à volume constant.

Dans le cas des fluides incompressibles, les expériences montrent que ces coefficients ne sont fonction que du seul nombre de Reynolds : (2, p. 120, 1963)

$$C_x = f_1 (Re)$$

$$C_z = f_2 (Re) \quad (4)$$

$$C_m = f_3 (Re)$$

Les cinq arguments cités ci-dessus sont très importants en hydro-aérodynamique car ils caractérisent l'influence des différentes propriétés physiques d'un fluide en ce qui concerne ses réactions au contact d'un corps solide. En particulier le nombre Re caractérise l'influence de la viscosité du fluide ; le deuxième nombre F , caractérise le rapport des forces d'inertie aux forces de pesanteur. Pour des nombres de Froude très grands, les forces d'inertie l'emportent ; s'ils sont très petits, les forces de pesanteur l'emportent. Dans le cas de l'étude du mouvement d'un solide en suspension dans un courant d'air vertical, les forces de gravité deviennent négligeables vis à vis des forces mises en jeu, l'influence de Froude disparaît. Le troisième facteur M est en rapport avec la compressibilité du fluide et son influence devient prépondérante lorsque la vitesse du corps solide, dans le milieu où il se déplace, atteint ou dépasse la vitesse de la propagation du son ; dans le cadre de cette étude les vitesses des graines dans l'air étant très faible, l'influence du nombre de Mach est insignifiante ($M < 0,2$). Quant au nombre de Prandtl, il caractérise le comportement thermique

du fluide, c'est-à-dire l'importance relative des effets dus à la viscosité du fluide vis à vis de ceux dus à sa conductibilité calorifique (Pour un gaz il est de l'ordre de l'unité et dans le cas de l'air il vaut 0,7). En négligeant aussi l'influence du dernier facteur comme on l'admet habituellement en aérodynamique on peut donc, avec une bonne approximation, écrire :

$$C_x = f_1 (Re)$$

$$C_z = f_2 (Re)$$

$$C_m = f_3 (Re)$$

Ces hypothèses suffiront-elles à résoudre le problème tel qu'il se pose à nous ? A chaque valeur des fonctions f_1 , f_2 , f_3 , correspond, dans une direction définie dans l'espace, un mouvement relatif du fluide et d'un solide de forme déterminée.

A titre d'exemple on a représenté sur la figure (4) la relation $C_x = f (Re)$

dans le cas d'un petit pois assimilé à une sphère parfaitement lisse. Dans ce cas il faut prendre pour dimension caractéristique le diamètre d du grain de petit pois et pour V , la vitesse de son centre de gravité. En raison de la symétrie parfaite de la sphère C_z ainsi que C_m ont des valeurs nulles et sa surface caractéristique à la valeur :

$$S = \frac{\pi d^2}{4}$$

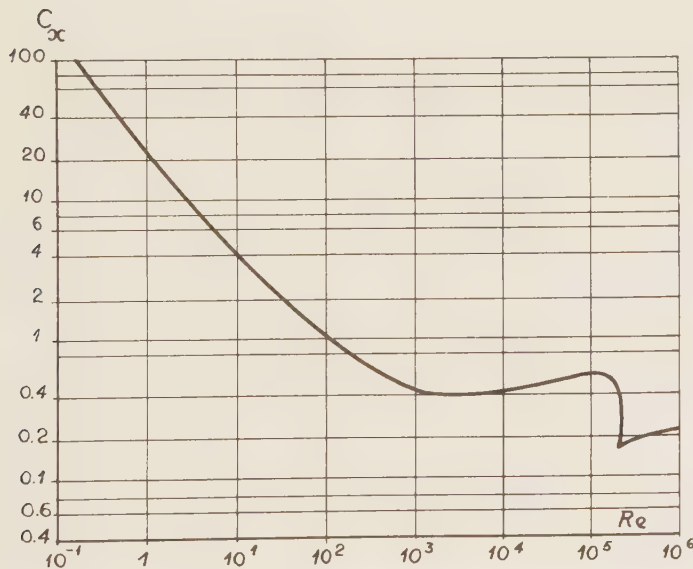


Fig. 4

Pour les petites valeurs de Re ($Re < 1$) cette fonction a été résolue par STOKES (1850) en négligeant les forces d'inertie devant les forces de viscosité $C_x = \frac{24}{Re}$ et plus tard par OSEEN (1910). Tenant compte des forces d'inertie, OSEEN a proposé la formule :

$$C_x = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re \right)$$

Le coefficient C_x (désigné par la suite sous la notation C_T) est fonction de l'état de la surface du grain c'est-à-dire le degré d'uniformité, de rugosité ou de pilosité et autres particularités remarquées non seulement pour différentes espèces mais encore pour une même catégorie de semences sphériques.

Les choses se compliquent énormément lorsqu'il s'agit de graines non sphériques, par exemple des grains de riz ou de blé qui sont ovoïdes et dont les coefficients de résistance dépendent dans une grande mesure de l'orientation dans le courant d'air. Le grain précipité librement dans un canal vertical est soumis, sous l'influence du moment des forces aérodynamiques ($C_m \neq 0$) à des oscillations angulaires autour de son centre de gravité ; à chacune des positions de ce grain qui tourne sans arrêt dans le canal correspond une valeur du coefficient C_T et par conséquent une valeur de la vitesse V . S'il s'agit d'un courant d'air dirigé de bas en haut, on observe un mouvement de va et vient continu du grain de haut en bas ou inversement de bas en haut. Compte tenu de ce fait aléatoire qui rend confus le phénomène on peut dire qu'il est presque impossible de donner une formule qui exprime les coefficients de résistance de façon théorique. En effet, il existe un coefficient de traînée pour chacune des valeurs de la vitesse par rapport à la position de la graine, position qui varie à chaque instant. L'étude théorique peut être entreprise pour quelques corps géométriques. Nous nous intéresserons seulement aux valeurs de C_T pour les vitesses limites de chute des graines et à la vitesse d'air permettant la flottation oscillatoire des graines.

Nous examinerons les principaux procédés expérimentaux de détermination des vitesses limites (ou bien oscillatoires) des graines afin de discuter de leurs avantages et de leurs inconvénients.

III.- PROCEDES UTILISANT UN COURANT D'AIR -

1.- Le procédé de flottation -

On peut créer un courant d'air dirigé verticalement vers le haut et chercher qu'elle doit être la vitesse v_s de ce courant d'air pour qu'une graine y flotte à une hauteur constante. Supposons que l'air se déplace de bas en haut dans une conduite tronconique placée verticalement et dont le diffuseur est dirigé

vers le haut. La vitesse de l'air dans chacune des sections horizontales est alors inversement proportionnelle en 1ère approximation à la surface de la section ; c'est-à-dire qu'elle décroît du bas vers le haut de la conduite. A chaque rotation du grain dans l'espace, contrairement à ce qui se passe pour une sphère il apparaît en plus de F_x deux composantes de la réaction du courant d'air F_y et F_z .

Sous l'influence de ces forces, des mouvements horizontaux se superposent aux déplacements verticaux et la trajectoire devient une courbe dans l'espace. Ces mouvements chaotiques qui sont fonction de la forme du grain, de la position de son centre de gravité, de son orientation, de l'homogénéité de la distribution des vitesses dans les sections horizontales du diffuseur et de la viscosité (μ) du fluide, etc ... peuvent toutefois se régulariser et aboutir à l'oscillation du grain entre des plans extrêmes ou même à la flottation à un niveau bien déterminé. Lorsqu'on introduit dans le diffuseur un échantillon de semences, le phénomène se complique du fait que les grains s'entrechoquent ce qui provoque des vitesses angulaires plus ou moins stables dans le temps et dans l'espace, des forces aérodynamiques supplémentaires (qu'on appelle l'effet MAGNUS) se produisent et atteignent une valeur importante. En raison de ceci les coefficients C_T et C_m obtenus en soufflant sur le corps immobile ne peuvent plus être utilisés et doivent être remplacés par de nouveaux coefficients C_T et C_m qui possèdent l'argument complémentaire $\frac{\omega l}{V}$ dans

lequel, ω est la vitesse angulaire autour d'un des innombrables axes de rotation.

Cet exposé donne un aperçu général de l'étendue et de la complexité du problème relatif à l'étude des propriétés aérodynamiques des semences, si l'on veut obtenir des résultats permettant de se faire une idée la plus exacte possible du processus de triage des graines par courant d'air. Dans le cas présent on peut procéder de deux manières :

- Premièrement, on peut en particulier, étudier le phénomène dans son ensemble ce qui conduit à laisser volontairement de côté un certain nombre de détails parfois importants puisque les coefficients sont donnés sous une forme empirique, ou semi-empirique. Les résultats d'une telle méthode sont moins généraux et demandent une détermination lors de chaque nouveau cas ; par contre ils peuvent être obtenus de façon relativement rapide et simple, tout en donnant un schéma assez fidèle du phénomène étudié ;
- La deuxième méthode consiste à analyser les micro-processus qui entrent en jeu dans le phénomène complexe. Cette méthode consiste en l'étude de l'action du courant d'air, et des parois de l'interaction des particules entre elles et d'autres facteurs. Cette étude est menée pour un grain isolé et tenant compte, de plus, de la forme, du poids, de l'état de la surface, etc ... L'examen de l'influence de tous ces facteurs ou des plus importants d'entre eux permet de mettre en évidence la nature physique du phénomène et en fin de compte d'aboutir à des résultats quantitatifs bien vérifiés par l'expérience et donnant une réponse convenable au problème posé.

2.- Action d'un courant d'air sur un grain isolé -

On peut étudier aussi les coefficients C_T , C_y et C_m de graines isolées, immobiles et orientées dans toutes les directions possibles dans un courant d'air. Cependant, malgré son aspect très simple, cette méthode s'avère assez complexe du point de vue expérimental.

On peut également s'intéresser à la position d'équilibre du grain en flottation dans le courant d'air.

3.- Analyse du procédé de flottation -

Reprenons la détermination de la vitesse de flottation (vitesse oscillatoire) et du coefficient de résistance des grains dans un courant d'air traversant une conduite divergente verticale. Si l'on élimine le paramètre forme géométrique du grain, la méthode sera d'autant plus précise que la répartition des vitesses sera plus régulière dans chaque section horizontale et que ces vitesses resteront plus longtemps constantes. L'expérimentation dans un diffuseur présente un certain nombre d'avantages, par rapport à celle effectuée dans une conduite cylindrique mais le diffuseur demeure malgré tout une mauvaise forme hydrodynamique. En réalité des recherches ont permis d'établir que c'est précisément dans le diffuseur que la répartition des vitesses dans la section horizontale est la plus irrégulière et que le degré d'irrégularité croît avec l'angle de conicité des parois.

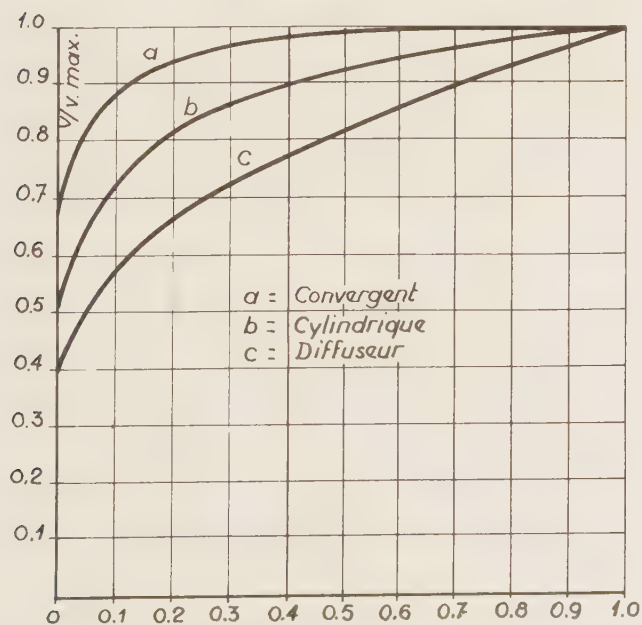


Fig. 5

Sur la figure (5)* d'après l'ouvrage de Dr. Nikuradse on a tracé les courbes de répartition des vitesses dans un diffuseur, dans une conduite cylindrique et dans un convergent dont les angles de conicité sont respectivement de $+4^\circ$, 0° et -4° . On voit que dans l'axe de l'écoulement, les vitesses diffèrent de plus d'une fois et demie de celles du voisinage des parois. Le diffuseur se révèle tout aussi peu satisfaisant du point de vue de la régularité de l'écoulement du courant d'air. En effet, les parois inclinées vers l'axe provoquent des

[*] "Recherches sur les courants d'eau dans des canaux convergents et divergents, VDI - VERLAG, Heft 289, 1929".

formes d'écoulement instables et donnent naissance à des tourbillons. De plus, lorsque les angles de conicité sont importants le courant peut, littéralement se détacher des parois, la masse essentielle du gaz s'écoule alors suivant une section inférieure à celle de la conduite et l'espace annulaire ainsi formé devient une zone de tourbillonnement intensif et de basse pression. Dans ces conditions l'écoulement s'accompagne de pertes hydrauliques particulièrement importantes. Toutes ces caractéristiques négatives apparaissent d'autant plus brusquement que l'angle de conicité du diffuseur est plus grand que les conditions de pénétration du liquide ou du gaz sont mal définies et que le courant d'air est moins uniforme. La figure (6) reproduit de façon très schématique le mouvement général du courant d'air et illustre les acquisitions antérieures dans ce domaine. La veine dynamique du courant est détachée des parois sous la forme d'une zone d'intense turbulence et de basse pression de l'air ; les tourbillons suivant la direction figurée sur le dessin. Un corps précipité dans le diffuseur et tombant, généralement, dans la veine dynamique sera,

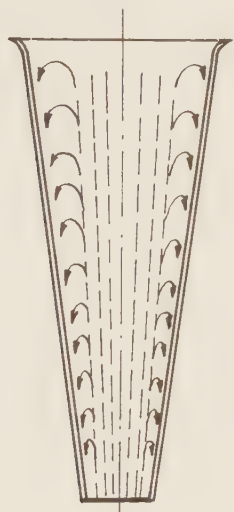


Fig. 6

soit expulsé par le courant d'air, soit maintenu en position de flottation. Dans ce dernier cas, il ne subira que l'effet des forces horizontales et surtout celui du gradient de pression dirigé, de l'axe du conduit vers les parois, c'est-à-dire, vers la zone tourbillonnaire de section annulaire. Il est tout à fait évident qu'il ne peut y avoir dans cette zone, de relation linéaire entre le débit de l'air et la vitesse, comme il en existe une dans la partie centrale ; en effet en aucun point de cette zone il n'y a de vitesse ayant une valeur et une direction définies. Pour que le schéma de la figure (6) soit absolument exact

il aurait sans doute fallu entreprendre une série d'essais spéciaux : étude du champ des vitesses, relevé des spectres des fumées, etc ... Pour avoir de meilleurs résultats il serait souhaitable du point de vue hydrodynamique que l'appareil de ce type travail par aspiration d'air. On peut sans exagération dire de cette méthode qu'elle ne peut être utilisée pour résoudre tous les aspects du problème posé, et qu'elle donne surtout des résultats concernant les plus importantes propriétés aérodynamiques de semences.

4. Procédé de modèle

L'étude des propriétés aérodynamiques d'un grain isolé est relativement facile à effectuer. Cette étude peut être réalisée sous la forme d'expérimentation sur un modèle de grain immobile et solidement fixé dans une position donnée. Cet essai peut se dérouler dans un courant d'air, un courant d'eau ou dans un autre fluide. Dans ces conditions on peut déterminer avec une très grande précision l'orientation de l'objet dans le courant lorsque le modèle est réalisé à une échelle agrandie. Les dimensions de l'objet rendent l'expérimentation plus facile et augmentent la précision de mesure des forces hydrodynamiques. Ces forces varient proportionnellement au carré de l'échelle linéaire et peuvent être poussées jusqu'aux limites nécessaires. En outre, la mesure de la vitesse du milieu fluide dans lequel l'essai s'effectue peut être extraordinairement simplifiée et poussée. Toute l'étude elle-même peut être conduite dans des conditions d'uniformité du champ des vitesses. Enfin, on peut par cette méthode, procéder à la détermination des moments des forces aérodynamiques pour évaluer la stabilité des différentes positions du grain dans le courant. Tout ceci constitue les avantages certains de cette méthode.

Cependant, il est démontré théoriquement que la similitude géométrique seule n'est pas suffisante. Pour pouvoir se faire une idée réelle du grain d'après un modèle il faut respecter la loi de similitude dynamique, autrement dit la similitude dans les deux cas, du système de forces. Celle-ci s'obtient par l'égalité des coefficients C_T , C_z et C_m pour le modèle et le grain réel ou, d'après les formules (3) par l'égalité des arguments (Re, F, M, P, γ) qui, dans le cas particulier qui nous intéresse, peuvent, ainsi qu'il a été dit plus haut, se ramener au nombre de Reynolds comme le cas d'écoulements de fluides incompressibles -

$R = \frac{V \cdot D}{\nu}$. Ainsi la similitude dynamique sera observée, lorsque les nombres de Reynolds établis pour le modèle et le grain réel seront égaux. Si, comme cela se produit dans une conduite dynamique, le fluide (air) utilisé est le même pour le modèle et le grain réel, le coefficient de viscosité dynamique caractérisant les particularités physique du fluide ne varie pas non plus, la loi de similitude dynamique donne : $\nu \cdot Re = V \cdot D = \text{Constante}$. Ceci veut dire que le rapport des vitesses du courant d'air dans les points homologues du modèle et du grain réel doit être inversement proportionnel au rapport des dimensions linéaires homologues. Ainsi, par exemple, si nous réalisons l'expérience avec un modèle de grain de blé 10 fois plus grand que nature, la vitesse du courant d'air doit être 10 fois moindre que dans la réalité ; ou bien d'une vitesse de flottation $v_s = 10 \text{ m/s}$, on doit avoir pour le modèle $v = 1 \text{ m/s}$. L'inconvénient de ceci réside dans la difficulté de mesurer avec une précision suffisante les forces de l'air de faible valeur qui agissent sur le modèle. C'est pourquoi, du point de vue expérimental, il serait

souhaitable, en ne satisfaisant pas sciemment à la loi de similitude, d'augmenter la vitesse pour amener l'action du courant sur le modèle à la valeur désirée. L'altération de la valeur des coefficients de résistance ainsi obtenus peut être très importante dans certains cas. Une telle méthode ne peut être utilisée que, lorsque, pour un grain "moyen" d'une variété quelconque, la fonction $C_T = f(Re)$ devient

pratiquement constante dans un domaine de nombres de Reynolds correspondant aux vitesses encore utilisable à des mesures. Il va de soi que l'étude de la fonction $C_T = f(Re)$ doit être effectuée pour toutes les orientations possibles du grain ; dans le cas où l'allure de la fonction $C_T = f(Re)$ est inconnue, ou ne répond pas à la condition mentionnée ci-dessus, il est absolument nécessaire de respecter la loi de similitude dynamique. On peut se baser sur la variation du coefficient de viscosité cinématique (ν) dans la formule :

$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$ c'est-à-dire qu'il faut utiliser un autre fluide pour qu'on puisse à la fois mesurer l'effort agissant sur le grain et réaliser la loi de similitude.

Par conséquent, les essais avec un modèle agrandi ne peuvent pas être faits dans l'air, mais doivent être effectués dans un fluide visqueux quelconque. Ceci est réalisable dans la pratique, étant donné qu'il n'est pas nécessaire d'avoir un appareillage spécial et compliqué. Mais, malgré cette conclusion, le problème n'est pas complètement résolu puisque les graines précipitées ou en flottation tournent autour d'elles-mêmes dans l'air. Les résultats destinés à être utilisés pour la construction des machines doivent tenir compte de ce fait.

IV.- PROCEDE DE CHUTE LIBRE

Puisque la vitesse de flottation des graines est égale à leur vitesse limite, nous pouvons donc déterminer cette vitesse de flottation par l'étude de leur chute libre dans l'air immobile. Dans ce cas il n'y a plus lieu de tenir compte de l'influence de couche limite au niveau de parois du canal non plus que de la répartition des vitesses, puisque l'air n'est pas en mouvement. Certains inconvénients sont éliminés de ce fait. Si l'on suppose la graine sphérique comme c'est le cas pour un petit pois, les forces suivantes lui sont appliquées durant sa chute :

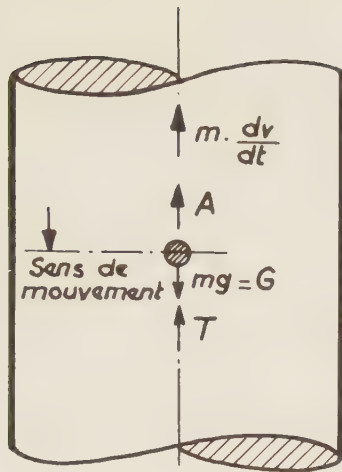


Fig. 7

$m \frac{dv}{dt}$: Forces d'inertie

$A = mg \frac{\rho}{\rho_s}$: Forces de pression ou bien poussée d'Archimède

$G = mg$: Forces de gravité

T = Forces de viscosité ou bien forces de trainée

où ρ : masse volumique de l'air
 ρ_s : masse volumique de la graine sphérique
 m : masse de la graine
 g : accélération de la pesanteur
 v : vitesse de chute à l'instant t

L'expression théorique de la résultante T s'écrit en général :

$$T = -6\pi\mu Rv - \frac{2}{3}\pi R^3\rho \frac{dv}{dt} - 6R^2\rho \sqrt{\pi v} \int_0^t \frac{v'(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \quad (5)$$

(1, p. 73, 1967) et (3, p. 70, 1964)

L'équation du mouvement du centre de gravité de la sphère est donc :

$$\frac{4}{3}\pi R^3\rho_s \frac{dv}{dt} = T + \frac{4}{3}\pi R^3g\rho_s - \frac{4}{3}\pi R^3g\rho \quad (6)$$

D'après la généralisation proposée pour des résultats déjà obtenus par Monsieur le Professeur Fortier (1, p. 78, 150 et 151, 1967) en admettant qu'à chaque instant la résistance de l'air se traduit par une force de trainée égale à celle qui correspondrait à une vitesse uniforme (ce qui est justifié par la faible masse volumique de

l'air), on peut écrire l'équation du mouvement en utilisant le coefficient de traînée habituel C_T comme dans les équations (2). En prenant donc :

$$T = \frac{1}{2} \rho C_T v^2 \pi R^2$$

on obtient :

$$\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_s \frac{dv}{dt} = - \frac{1}{2} \rho C_T v^2 \pi R^2 + \frac{4}{3} \pi R^3 g \rho_s - \frac{4}{3} \pi R^3 g \rho \quad (7)$$

On admet que la graine ne tourne pas. En effet, si elle tourne sur elle-même d'autres forces transversales par rapport à la direction du mouvement apparaîtront, forces dues à l'effet MAGNUS dont la grandeur dépend du décollement de la couche limite le long de la graine (2, p. 131, 1963). *

Si on remplace

$$m = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho \quad \text{et}$$

$$S = \pi R^2$$

l'équation de mouvement d'un grain sphérique en chute libre s'écrit :

$$m \frac{dv}{dt} - mg + mg \frac{\rho}{\rho_s} + \frac{1}{2} \rho C_T v^2 S = 0 \quad (8)$$

$$\frac{dv}{dt} - \frac{1}{2m} \rho C_T v^2 S - g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) = 0$$

Pour une graine de petit pois ayant le diamètre de 10 mm et la vitesse approximative de 8 m/s, le nombre de Reynolds est de l'ordre de 5×10^3 , d'autre part la courbe de $C_T = f(Re)$ (fig. 4), valable pour une sphère, C_T est presque constant pour les valeurs de $10^3 < Re < 10^5$ nous pouvons donc supposer que :

$$\frac{dv}{dt} = 0 \quad \text{pour } v \rightarrow v_L \text{ (vitesse limite)}$$

En dernière analyse l'expérience montre que pour des valeurs de Re voisins du nombre de Re critique et pour de faibles vitesses de rotation, la force transversale (autrement dit la portance)

./.

$$C_T = \frac{2mg (\rho_s - \rho)}{\rho_s \rho \frac{S}{v_L^2}} \quad \text{ou} \quad v_L = \sqrt{\frac{2mg (\rho_s - \rho)}{\rho_s \rho \frac{C_T S}{v_L^2}}} \quad (9)$$

Si l'on peut déterminer la valeur v_L par la voie expérimentale, on peut espérer calculer le coefficient de trainée par cette formule pour une graine sphérique du moins. Mais, il est bien évident que, s'il s'agit de graines non sphériques, cette formule n'est plus applicable. Dans certains cas pour avoir une idée du coefficient C_T on peut toutefois l'utiliser négligeant ainsi les autres forces principalement dues à l'effet MAGNUS. On choisit alors

$\frac{\pi}{4} L_1 L_2$ comme valeur approchée de S où L_1 et L_2 sont les deux plus

grandes dimensions de la graine, ce choix vient de ce que nous ne pouvons pas savoir comment tombent ces corps et de ce que nous ne connaissons pas leur orientation aux niveaux où ils atteignent leurs vitesses limites. En tout état de cause le problème se ramène à la détermination des vitesses limites. Les graines n'atteignent théoriquement celles-ci que si la hauteur de chute tend vers l'infini. D'après le document (13), on peut admettre que les graines précipitées dans l'air immobile, atteignent une vitesse égale à 99 % de leurs vitesses limites pour une hauteur de chute de 10 mètres dans l'exemple indiqué, et pour la vitesse limite théorique de 7 m/s ; ceci dans le cas où la vitesse initiale est nulle et le coefficient C_T

demeure constant. Si la mesure se fait dans une zone où les graines ont atteint leur vitesse limite la détermination de celle-ci se fait facilement par la mesure du temps de passage entre deux niveaux connus. Ceci peut être effectué aussi par un procédé photographique dans une chambre noire ; les graines tombent devant une caméra placée horizontalement dont l'objectif est ouvert à ce moment un stroborama lance des éclairs à une fréquence déterminée, choisie selon la valeur de vitesse de chute ; on peut donc avoir une image de la graine à chaque éclair, c'est-à-dire aux différents niveaux de la chute. Au début de notre étude nous envisagions d'effectuer ces essais par voie photographique puisque nous disposions dans les laboratoires du C.N.E.E.M.A. des appareils nécessaires. Après avoir fait quelques essais, nous nous sommes rendus compte que la précision de l'installation n'était pas suffisante pour une recherche comme celle-ci. En effet on obtenait des résultats affectés d'une erreur de 7 pour cent, et il apparaît qu'il faut obtenir une précision meilleure.

Nous nous sommes engagés dans la voie suivante pour déterminer les vitesses limites : nous envisageons de mesurer les vitesses qu'atteignent les graines précipitées dans l'air immobile à la fin d'un tube de 9 mètres de haut, placé verticalement. Ces valeurs obtenues sont très proches des vitesses limites théoriques. Il est très difficile d'utiliser une fraction de l'énergie de mouvement pour mesurer le temps de passage d'une graine entre les deux sections repères et un procédé mécanique, n'est pas à envisager.

Aussi nous utilisons pour chaque section deux faisceaux lumineux faisant entre eux un angle de 90° et dans la bissectrice de cet angle nous plaçons un groupe de cellules photoélectriques. Nous pouvons mesurer le temps de chute avec une précision considérable à l'aide d'un chronomètre électronique. Ce système est plus avantageux que les autres procédés cités ci-dessus du point de vue de la précision et il permet de plus d'éviter l'aspect confus du phénomène dû à la couche limite des parois puisque nous opérons dans l'air immobile.

V. - RAPPEL DE TRAVAUX ANTERIEURS -

Il semble que le Docteur Ingénieur Gasterstädt soit l'un des premiers à avoir entrepris l'étude de la vitesse de flottation de diverses semences dans l'ouvrage intitulé "*Etude expérimentale du processus de transport pneumatique*" (4, p. 148, 1935). Cet ouvrage décrit les expérimentations concernant la vitesse de flottation de divers produits, l'auteur les relie à la vitesse de transport d'une masse de grain par un courant d'air circulant dans une conduite horizontale. Laisant de côté un bon nombre de détails expérimentaux on peut dire que les essais ont été effectués dans un diffuseur placé verticalement. Le diffuseur se compose d'un tube de verre de 500 mm de longueur dont le diamètre inférieur est de 78 mm et dont le diamètre supérieur est de 93 mm. Ce tube tronconique est prolongé à sa partie supérieure et à sa partie inférieure par des tubes métalliques cylindriques ; l'angle de conicité du tube tronconique est de $1,7^\circ$. Le débit d'air est déterminé en fonction de la perte de charge Δh d'un diaphragme placé dans la partie cylindrique supérieure, la vitesse moyenne de l'air a pu être calculée en fonction du débit d'air et de la section de la conduite ; puis en introduisant un coefficient auxiliaire d'essai relatif à la distribution des vitesses sur la section, on a calculé la vitesse obtenue dans l'axe du diffuseur. Les semences sphériques se maintenaient dans la conduite à une hauteur déterminée ; parfois même avec une étonnante précision.

Pour un matériel dont la vitesse de flottation varie fortement suivant l'orientation dans le courant d'air, il se produit, en même temps qu'un phénomène de rotation, un mouvement régulier d'élévation et de descente (oscillation) entre des positions extrêmes quelconques (hautes et basses) qui donnent, pour le blé par exemple, d'excellents résultats moyens. Une partie des résultats des essais réalisés par Gasterstädt sont indiqués dans le tableau (I), ci-dessous :

MATERIEL	v_g [m/s] vitesse de flottation
Maïs	8,0 - 9,5
Blé	9,8
Orge	8,9
Pois	17,0

TABLFAU I

Des essais presque similaires ont été entrepris par Brenner et réunis dans un ouvrage intitulé *"Contribution à la connaissance du processus de triage au cours de la séparation de semences par un courant d'air"* (4, 1935). Il faut remarquer que l'auteur, qui attache une grande valeur à l'uniformité du mouvement du courant d'air dans le diffuseur, a installé dans la partie moyenne de l'appareil (partie comprise entre le ventilateur et le diffuseur) un certain nombre de dispositifs : grilles, croisillons, etc. ... La mesure de la vitesse du courant d'air a été effectuée au niveau de la section supérieure du diffuseur à l'aide d'un tube de Pitot et d'un micromanomètre. Les dimensions du diffuseur en verre étaient les suivantes : diamètre de la section supérieure 66 mm ; diamètre de la section inférieure 52 mm, longueur 520 mm, l'angle de conicité était donc égal à 1,5°.

Brenner donne les valeurs des coefficients de résistance et des vitesses de flottation pour des grains d'avoine et de blé. Etant donné que l'orientation du grain a une grande influence sur ces deux facteurs, C_T et v_L , Brenner a tenté de les rapporter à une position déterminée de l'objet, notamment aux positions longitudinales et transversales par rapport à la direction de la vitesse du courant d'air. Ceci a été obtenu en fixant, à l'endroit voulu du grain un petit fil qui sert de gouvernail et stabilise le grain à la position désirée.

On a porté sur le tableau (II) les données des essais obtenues par Brenner.

	BLE		AVOINE	
	Longitudinalement	Transversalement	Long.	Trans.
S (mm ²)	5,5	15	4,3	10
v_L (m/s)	19,3	2,0	21,5	7,5
C_T	0,185	0,325	0,155	0,350

TABEAU II

Au cours de l'été 1930, en Russie, des essais préliminaires de caractère qualitatif ont été entrepris à l'Institut de Mécanisation de l'Agriculture qui possédait une installation d'essai construite sur le modèle de celle de Brenner. Le diffuseur en verre avait les dimensions suivantes : grand diamètre 79 mm et petit diamètre 48 mm, ce qui donne, pour une longueur de 500 mm un angle de conicité d'environ 3,5°.

Des grains de blé introduits dans le courant d'air étaient immédiatement refoulés contre la paroi et par la suite ne s'en détachaient pratiquement pas, restant en mouvement presque continu autour d'une certaine position moyenne. La hauteur à laquelle le grain s'arrêtait, dépendait peu du débit de l'air dans le diffuseur. C'est pourquoi, contrairement aux essais de Gesterstädt et même de Brenner, il n'a pas été possible de déterminer par cette méthode la valeur de la vitesse de flottation difficulté que nous avons déjà mentionnée plus haut. Selon que les vitesses de l'air sont trop grandes ou trop petites le grain qui, au moment de sa pénétration dans le diffuseur se trouve dans la partie centrale de la section du courant d'air, peut être éjecté par le divergent, ou bien retomber au fond du diffuseur. Lorsqu'on charge le tube avec une certaine quantité de grains, la plus grande partie de celles-ci se sépare en deux catégories : les graines qui tombent dans la partie centrale de la section sont immédiatement expulsées hors du diffuseur les autres graines se répartissent le long de la paroi sur les deux tiers environ de sa longueur et demeurent continuellement en mouvement. Le nombre de cette dernière catégorie de graines diminue petit à petit du fait que quelques graines rebondissent dans la partie centrale de la section et ainsi sont évacuées l'une après l'autre par le haut.

La solution de Brenner qui consiste à étudier deux positions du grain perpendiculaires l'une par rapport à l'autre ne peut probablement pas être considérée comme bonne ; en effet le frottement de l'air sur le fil collé au grain n'est pas négligeable, comparé à la force de résistance du grain lui-même et augmente la valeur calculée de C_T . S'il s'agit d'autres orientations dans le courant d'air, il est presque impossible d'étudier le phénomène à cause de l'instabilité du système. Cette étude peut être effectuée sous forme d'expérimentation sur un modèle de grain agrandi à une échelle supérieure. A partir de cette idée, c'est dans le même Institut, en Russie, qu'ont été réalisés des essais avec les modèles de grains de blé placés dans un courant d'air. Pour les essais on a choisi du blé d'hiver "*Oukrainka*", blé de semences de la récolte de 1929. Tout le lot de grain a été trié avec deux tamis constitués de tôles perforées à trous rectangulaires. On a ainsi obtenu des échantillons dont les poids moyens sont, dans l'ordre numérique, I = 52,7 mg., II = 39,6 mg., III = 12,4 mg. La méthode de travail employée est la suivante : en utilisant un appareil optique on a projeté sur un verre dépoli les grains de chaque groupe suivant des positions perpendiculaires l'une à l'autre, en les grossissant 11 fois ; on a dessiné les contours obtenus ; puis chaque grain a été découpé en plusieurs parties suivant des sections perpendiculaires à l'axe longitudinal. Ces sections ont elles-mêmes été dessinées par le même procédé et dans le même rapport d'agrandissement. Les dessins ainsi obtenus ont permis de confectionner des modèles en bois qui ont été essayés par la suite. Mais, si l'on tient compte de certaines particularités des graines (rugosité, pilosité, etc ...) ces essais

bien que respectant les formes géométriques paraissent peu précis. Les essais des modèles ont été poursuivis dans une petite soufflerie aérodynamique du laboratoire Polytechnique de Leningrad. Le diamètre utile de la conduite est de 300 mm ; la vitesse maximum de l'air est d'environ 40 m/s. Les expériences ont été réalisées avec un courant d'air de 33 à 34 m/s. On a mesuré la vitesse de l'air avec un micro-manomètre ainsi qu'avec une sonde de Prandtl. La force du courant d'air agissant sur le modèle a été mesurée grâce à une balance aérodynamique. Le calcul des coefficients C_T a

été effectué d'après les formules (2). Etant donné que la section du grain perpendiculaire à l'axe du courant, et généralement représentée par S dans les formules, varie énormément en fonction de la direction du courant. On a pris pour S , le volume du grain à la puissance $2/3$ qui a été déterminée par pesées successives dans l'air et dans l'eau à

l'aide d'une balance de précision. Avant l'essai, on a solidement fixé le modèle de grain à la balance. La figure (8) donne la position du grain et du système de coordonnées dans le courant. Pour position initiale on a pris :

$$\alpha = 0^\circ \text{ et } \beta = 0^\circ$$

D'après des essais, les résultats des calculs sont donnés dans le tableau (III).

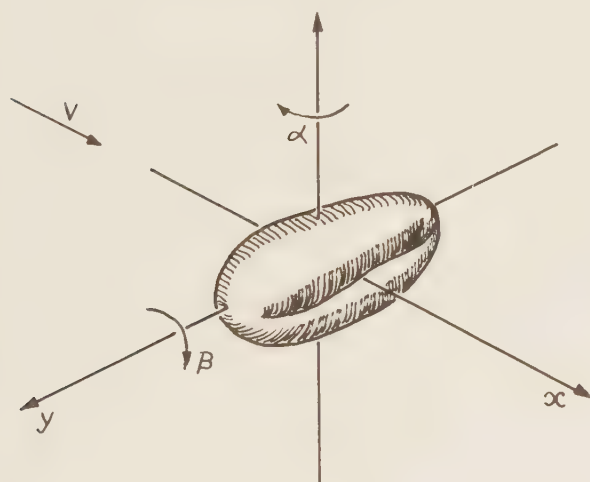


Fig. 8

	Ier Groupe de Grain			IIIe Groupe de Grain		
	N° 3	N° 9	N° 13	N° 35	N° 36	N° 40
C_T	0,600	0,495	0,628	0,549	0,469	0,695
v_L (m/s)	8,75	8,50	8,0	6,06	6,68	5,54
	$v_L = 8,4 \text{ m/s} - C_T = 0,574$			$v_L = 5,8 \text{ m/s} - C_T = 0,571$		
	moy.			moy.		

TABLEAU III

De l'examen de ce tableau pour autant qu'il soit permis de généraliser en partant d'essais trop peu nombreux, il ressort que les coefficients de résistance C_T sont presque égaux pour les groupes de grains. Les conditions des essais sur le modèle correspondaient au cas de flottation d'un grain isolé dans un diffuseur vertical, on en a conclu, du fait que les valeurs de $C_T = \text{Constant}$ pour les deux échantillons, ce qui nécessitait une vérification expérimentale très poussée, que le niveau de flottation des différentes graines (graines bien denses comme celles du groupe I ou graines plus légères comme celles du groupe III serait déterminé non par les coefficients de traînée, mais par leurs caractéristiques pondérales et géométriques.

Après avoir présenté les travaux effectués au début de ce type d'essais nous citerons brièvement quelques uns des plus importants qui ont été réalisés ultérieurement.

En 1953 (9, p. 86, 1955) à l'Institut des Machines Agricoles de Brunswick on a essayé de trier des grains de blé dans lesquels se trouvaient des grains d'une espèce de scabieuse. En effet, on a trouvé dans du blé Turc dont on a importé des quantités importantes en Allemagne Fédérale, des graines de scabieuse, plante qui pousse en Proche Orient. La présence d'une proportion très petite de graines de scabieuse dans le blé rend ce dernier inutilisable pour la nourriture humaine. Après examen des procédés de nettoyage paraissant économiques, on a retenu le nettoyage pneumatique. Des recherches faites à l'Institut, ont déterminé les pertes possibles en raison des propriétés physico-technologiques des grains de blé et de scabieuse, lors de l'utilisation d'installations de nettoyage pneumatique, présentant un degré d'efficacité maximum.

Le Prof. Milner (8, 1955) a réalisé, en collaboration avec Farrell et Katz une série d'essais préliminaires afin de mettre au point un système de triage des matières étrangères des graines. Les graines isolées ont été projetées par deux bandes tournantes avec une vitesse constante aux environs de 8 m/s. L'axe du jet était incliné de 30° par rapport à l'horizon. Les graines peuvent être regues selon leur poids, leurs dimensions, leur forme et les autres caractéristiques de leur surface dans différents récipients placés successivement l'un par rapport à l'autre. On a obtenu ainsi les différentes fractions d'un échantillon de grains de blé. D'après les résultats obtenus pour d'autres grains on a pu discuter des possibilités de leur séparation.

Les trois chercheurs, Bilanski, Collins et Chu (10, 1962) ont tenté d'utiliser les propriétés aérodynamiques des graines lors d'une chute libre. On a utilisé la formule suivante pour calculer la vitesse limite :

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot mg}{C_T \cdot S \cdot \rho}}$$

où

C_T : Coefficient de trainée

S : Maître-couple de la graine

ρ : Masse volumique du fluide

à condition que les valeurs S et C_T soient connues. Etant donné que l'on ne peut pas connaître la position ou l'orientation d'une graine tombant dans l'air, par rapport à sa direction de chute on a pris pour surface :

$$S = \pi \frac{L_1 \cdot L_2}{4}$$

où L_1 et L_2 sont les plus grandes dimensions de la graine. Un chronomètre de précision a été utilisé pour mesurer, à l'aide d'une photo-cellule le temps de chute d'un grain tombant sans vitesse initiale. Le tube cylindrique placé verticalement avait les dimensions suivantes ; la hauteur 9 m et le diamètre 60 cm. En bas un microphone a été disposé pour arrêter le chronomètre par changement de tension causé par l'impact de la graine sur un diaphragme d'aluminium. Chaque essai a été réalisé pour un échantillon de 20 graines. Les essais réalisés pour quelques hauteurs de chute permettent de tracer une courbe distance-temps. On a pu constater ainsi quelle était la partie de la courbe relative à chaque graine qui correspondait aux résultats de la formule théorique.

On a également pu déterminer quelles étaient les graines atteignant leur vitesse limite sur une hauteur de chute de 9 mètres. En rapprochant les résultats obtenus pour dix espèces de graines on est arrivé à la conclusion que les coefficients de trainée sont proportionnels au carré des vitesses limites et presque constants aux environs de la valeur 0,50.

KROMBHOLZ (13, 1965) a effectué une série d'essais en vue de la détermination des vitesses limites des pailles à l'Institut des Machines Agricoles de l'Université Technique de Dresden. D'après les résultats théoriques, on signale que, pour une vitesse limite de 7 m/s, il suffit de laisser tomber les grains de la hauteur de 10 mètres pour qu'ils atteignent une vitesse ayant une valeur de 98 % de celle de la vitesse limite. La hauteur du tube vertical est de 5 mètres. Le système de mesure est analogue à celui utilisé par Bilanski. On a intégré l'équation de mouvement :

$$\frac{dv}{dt} - g + \frac{g}{v_L^2} v^2 = 0$$

pour les cas suivants :

C_T : Constant ;

$$C_T = f \left(\frac{1}{V} \right) \text{ et}$$

$$C_T = f \left(\frac{1}{V^{0,25}} \right)$$

Cette deuxième recherche effectuée par Bilanski (15, 1965) en collaboration avec Lal, utilisant un diffuseur tronconique de 3°, a donné les coefficients de trainée des pailles en relation avec leur longueur. La vitesse mesurée par un tube de Pitot était de 9 m/s.

Schaub a étudié (23, 1965) la séparation basée sur l'identification électronique de la couleur des éléments à trier. En règle générale, les procédés employés reposent sur l'utilisation de photocellules comme élément détecteur. Placées dans une trémie les céréales à sélectionner sont transmises via une table vibrante à une courroie de transport au profil en forme de V ; de cette manière, les graines peuvent être amenées une à une dans une chambre optique renfermant 2 ou 4 photocellules de détection et un nombre égal de plaques colorées de référence. Ces photocellules sont utilisées pour comparer la couleur des graines passant devant elles à celle des plaques de référence. Ces dernières sont interchangeables et choisies de manière à présenter la même couleur et le même coefficient de réflexion que les graines saines à trier. Dans ces conditions lorsqu'une graine de couleur non conforme (ou présentant un coefficient de réflexion anormal) se présente dans la chambre optique, elle est aussitôt détectée par les photocellules qui transmettent à un amplificateur une impulsion commandant l'ouverture électromécanique d'un injecteur à air comprimé. Un jet d'air est alors envoyé sur la graine qui, se trouvant déviée de sa course normale tombe dans le récipient affecté aux graines avariées.

On signale aussi que ce procédé peut être modifié de la manière suivante : les graines à trier sont en effet appelées à passer devant une pointe qui se trouve portée à un potentiel positif élevé, uniquement lorsque les photocellules détectent une anomalie de constitution. Chargées positivement ces graines continuent normalement leur course jusqu'à deux plaques métalliques portées respectivement à un potentiel négatif et positif. Les mauvaises graines (chargées positivement) sont de ce fait attirées par la plaque de droite : leur trajectoire est donc modifiée et elles tombent dans le récipient de gauche. Quant aux bonnes graines, n'étant portées à aucun potentiel électrique, elles ne sont pas déviées par les plaques métalliques et tombent normalement dans le récipient de droite.

Les deux assistants professeurs de l'Université de Californie Keck et Goss (20, 1965) ont étudié les coefficients de trainée et les vitesses limites des graines de Luzerne et de Trèfle ainsi que de sphères de nylon par le procédé de chute libre. On a utilisé le système de photocellule pour le déclenchement du chronomètre et en fin de chute le système du microphone-diaphragme. Les mesures ont été faites chaque 60 cm sur une hauteur totale de 900 cm soit 15 fois. Ainsi, on a obtenu une courbe déplacement-temps et d'après la formule Lapple :

$$v = 1,74 \sqrt{g \cdot d \cdot (\rho_p - \rho_a) / \rho_a}$$

on s'est rendu compte que les sphères de nylon atteignaient 94,6 % de leur vitesse limite pour une chute de 9 m.

Cette même année, Garrett et Brooker, de l'Université de Missouri (21) ont effectué une étude de coefficient des grains de blé de trois variétés différentes et de corps sphériques par la voie photographique. Les graines ont été lancées dans une canalisation noire avec une vitesse plus élevée que la vitesse limite. Une caméra fabriquée spécialement et placée horizontalement dont l'objectif était ouvert durant le temps voulu est réglée de sorte qu'on puisse photographier le grain. Le film se déplace horizontalement avec une vitesse constante et connue. Ainsi, on a une courbe déplacement en fonction du temps ce qui conduit à tirer la vitesse et puis l'accélération par un appareil donnant la dérivée. On suppose que le diamètre caractéristique de la graine est donné par :

$$d = \frac{3}{\pi} \sqrt{\frac{6 \cdot p}{\gamma}}$$

où

p : poids

γ : densité,

afin de pouvoir calculer un nombre de Reynolds et un coefficient de trainée. Il ne faut pas oublier que le procédé d'essai entraîne une erreur due à la déviation des trajectoires des graines en raison de leurs rotations sur elles-mêmes, surtout dans le plan qui contient la caméra et l'axe du canal.

Kiker et Poss, de l'Université de Floride (25, 1966) en tenant compte de la nécessité de l'étude du comportement des graines non isolées, pour se rapporter à la pratique industrielle ont étudié le mouvement des essais de graines par le procédé photographique. On prend une vue dans chaque 60 cm de hauteur du canal vertical pour une chute totale de 600 cm, soit dix photos. La position de la caméra dont la capacité est de 2.500 vues par seconde,

peut être modifiée à chaque essai. Quant aux graines, elles sont lancées par un récipient dans lequel les remonte un élévateur qui tourne continuellement.

La courbe de vitesse-déplacement des graines est obtenue par la mesure des vitesses moyennes des graines sur 15 cm dans chaque vue courant 50 cm ; on mesure aussi la vitesse de l'air. La précision de mesure de la vitesse est de l'ordre de 1 %.

Les trois chercheurs Hawk, Brooker et Cassidy (27, 1966) de l'Université de Missouri ont étudié les caractéristiques aérodynamiques des semences par le procédé de flottation dans l'air. La formule suivante a été utilisée pour calculer la résistance de trainée :

$$C_T = \frac{2 T}{S \cdot \rho \cdot V^2}$$

où

T : Force de trainée ;
S : Maître-couple du grain,

(le diamètre de la sphère ayant le même volume pour calculer la surface S, supposé

$$\sqrt[3]{\frac{1}{1, 1_2, 1_3}}$$

moyenne géométrique des plus grandes dimensions du grain) ;

V : Vitesse de l'air ;
ρ : densité de l'air ;
C_T : coefficient de trainée.

Le tube d'essai de plexiglas dont le diamètre est 200 mm était placé verticalement. L'entrée de l'air a été améliorée pour avoir une vitesse d'air uniforme à travers la section du tube en sorte que la dispersion par rapport à la vitesse moyenne était de l'ordre de 4 %. On a utilisé un tube de Pitot et un manomètre pour mesurer la vitesse et pour contrôler l'installation sur des sphères de nylon de diamètre 3 mm. Lors de la comparaison des résultats moyens expérimentaux sur 10 échantillons et des résultats obtenus par le calcul théorique on a pu constater une bonne concordance. Les valeurs données des vitesses limites et de coefficient de trainée pour de grains de blé sont :

$$v_L (6,5 - 8,0) \text{ m/s, et}$$

$$C_T = 0,56$$

On a pu discuter aussi les différents résultats donnés par d'autres chercheurs.

Brooker et Cassidy en faisant des essais en collaboration avec Mueller de l'Université de Missouri, (29, 1967) ont également effectué une série d'essais afin de trier les bonnes noix des mauvaises. Les vitesses limites sont déterminées par l'utilisation d'un appareil original conçu pour cette étude (27). Dès que la noix flotte dans l'air, la vitesse oscillatoire est déterminée par la mesure au tube de Pitot de la vitesse de l'air sur une moyenne de 5 essais pour chaque catégorie de noix. On assimile la noix à une sphère de même volume pour calculer le diamètre caractéristique d , et le maître-couple S qui intervient dans la formule suivante :

$$C_T = \frac{2 T}{S \cdot \rho \cdot V_L^2}$$

On a pu constater que la dispersion de C_T en fonction Re , a une valeur presque constante surtout pour Re compris entre $0,85 \cdot 10^6$ et $1,6 \cdot 10^6$ de même pour la dispersion de C_T en fonction du poids spécifique des bonnes noix et des mauvaises.

Il serait très intéressant de connaître ce qui se passe si deux noix ayant le même volume, une bonne et une mauvaise, sont introduites dans ce tuyau avec une même vitesse initiale. Il est possible que leurs coefficients soient égaux, dans ce cas la mauvaise noix, ayant le poids spécifique inférieur aurait une accélération différente et par conséquent un déplacement différent de celui de la bonne noix. Si les coefficients étaient constants pour toutes les noix, il serait ainsi possible de les séparer parfaitement. Malheureusement, ce n'est pas le cas et on ne peut ainsi arriver à un résultat. On propose une autre méthode qui consiste dans l'étude des trajectoires de graines jetées avec une vitesse connue dans un courant d'air horizontal. Après avoir déterminé leurs trajectoires par le procédé photographique ainsi que par la voie théorique la solution a été obtenue avec l'aide d'un calculateur électronique.

Christian von Zabeltitz a étudié les coefficients de résistance pour des sphères isolées et pour des produits en vrac (30, 1967) dans l'Institut Brunswick. D'après l'étude de Matthies, les coefficients des semences en vrac peuvent être calculés à partir du coefficient relatif à des sphères, affecté lui-même d'un autre coefficient. Les coefficients de résistance des sphères isolées et en vrac ont été étudiés dans le but de passer à des graines. La formule suivante a été utilisée comme équation de mouvement des sphères dans l'air :

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = G + A + T$$

où

G : Forces de gravité ;

A : Forces de poussée ;

T : Forces de frottement ;
 m : masse de la sphère ;
 v : vitesse.

d'autre part

$$T = C_T \cdot S \cdot \frac{\rho}{2} V_r \text{ et}$$

$$R = \frac{V_r \cdot d \cdot \rho}{n}$$

dans laquelle

S : maître couple de la sphère ;
 ρ : masse volumique de l'écoulement ;
 V_r : vitesse relative entre la sphère et l'écoulement ;
 d : diamètre de la sphère ;
 n : viscosité dynamique du fluide.

On a donc tracé les courbes correspondant aux formules proposées par différents chercheurs en fonction du nombre de Reynolds. De plus on a cherché à savoir quel était l'écart par rapport aux résultats expérimentaux pour chacune des formules proposées. En reprenant la formule d'OSEEN, qui se trouvait la plus convenable, sous la forme de :

$$C_T = \frac{m}{Re} + n,$$

on a essayé de déterminer les nombres m et n qui s'accordent le mieux avec les résultats expérimentaux, ceci à l'aide d'un calculateur analogique. On a constaté que les valeurs suivantes de C_T s'accordaient avec un faible écart aux résultats expérimentaux :

$$C_T = \frac{34}{Re} + 0,9 \quad \text{pour } 3 < Re < 80$$

$$C_T = \frac{75}{Re} + 0,4 \quad \text{pour } 80 < Re < 10^4$$

(avec une erreur de $\pm 5 \%$) et

$$C_T = \frac{21}{Re} + \frac{6}{\sqrt{Re}} + 0,28$$

$$C_T = \frac{18,5}{Re} + \frac{0,23}{\sqrt{Re}} + 0,25$$

(avec une erreur de $\pm 10 \%$)

La formule suivante a été proposée pour des sphères en vrac :

$$\left(\frac{C_T'}{C_T}\right) = 1 + \left(z' \cdot \frac{K_w}{\delta}\right)^{1 + \frac{0,16}{\delta}}$$

où :

C_T' : coefficient de résistance d'un amas de sphères ;

C_T : coefficient de la sphère isolée ;

z' : nombre des sphères parasites autour de la sphère principale ;

K_w : coefficient qui caractérise le rapport des sphères parasites à la sphère principale ;

δ : rapport de la distance entre la sphère principale et les autres au diamètre de la sphère principale.

Si des sphères sont en contact δ vaut 1 et ainsi la formule s'écrit :

$$\frac{C_T'}{C_T} = 1 + (z' \cdot 0,16)^{1,16} \quad 0 < z' < 35$$

B.- METHODE DE MESURE

I.- DESCRIPTION DE L'INSTALLATION

La vue d'ensemble de l'installation est représentée figure (9). Le diamètre du tube d'essai est de 300 mm. Ce choix résulte des essais préliminaires que nous avons fait : en laissant tomber un nombre de 500 grains d'une hauteur de 7 m à l'air libre (sans tuyau), on a pu constater que ces grains ont été dispersés dans un cercle de 250 mm de diamètre. On utilisait une épaisse couche de graisse comme dispositif de réception. On peut considérer que les grains ne se heurtent pas aux parois, en effet en disposant une lampe au fond du tube d'essai et en examinant du haut par un oeillet percé à côté du système de lâchage nous avons pu le vérifier lors d'essais préliminaires.

La distance du point de lâchage à la base, c'est-à-dire au premier faisceau lumineux est de 892 cm. La distance entre les deux faisceaux lumineux est 49,85 cm. La hauteur du milieu de deux faisceaux est arrondie à 917 cm pour les calculs des vitesses théoriques des billes.

Le tube ainsi que toutes autres pièces sauf celle entre les deux faisceaux lumineux sont en matière plastique dont le coefficient de conductibilité thermique est assez faible ce qui amortit les variations brusques de la température ambiante. Tout le système, c'est-à-dire le tube d'essai est hermétiquement fermé pour empêcher le courant d'air qui pourrait être dû au tirage naturel du tuyau fonctionnant comme une cheminée. Une plaque transparente située entre le boîtier source de lumière et le tube d'essai, permet le seul passage du faisceau lumineux, et empêche le mouvement de l'air causé par les ventilateurs de refroidissement des lampes.

La vue de l'intérieur du système est présentée sur la figure (10).

Le système de lâchage est hermétiquement couvert par un sac de nylon lors des essais isolés. Le grain est placé entre les deux tiges de l'appareil grâce à une petite ouverture pratiquée sur le sac, cette ouverture est ensuite fermée par une bande de scotch. Le sac de nylon permet de visser facilement l'écrou à oreilles lors du lâchage du grain.

Le système de lâchage en essaim se trouve sous un boîtier transparent, en l'ouvrant on peut disposer les grains dans leurs trous. La boîte est ensuite refermée et les grains sont lâchés par coïncidence des deux plaques perforées obtenue par action d'un électro-aimant. Le passage de courant est réalisé par une prise Jaeger.

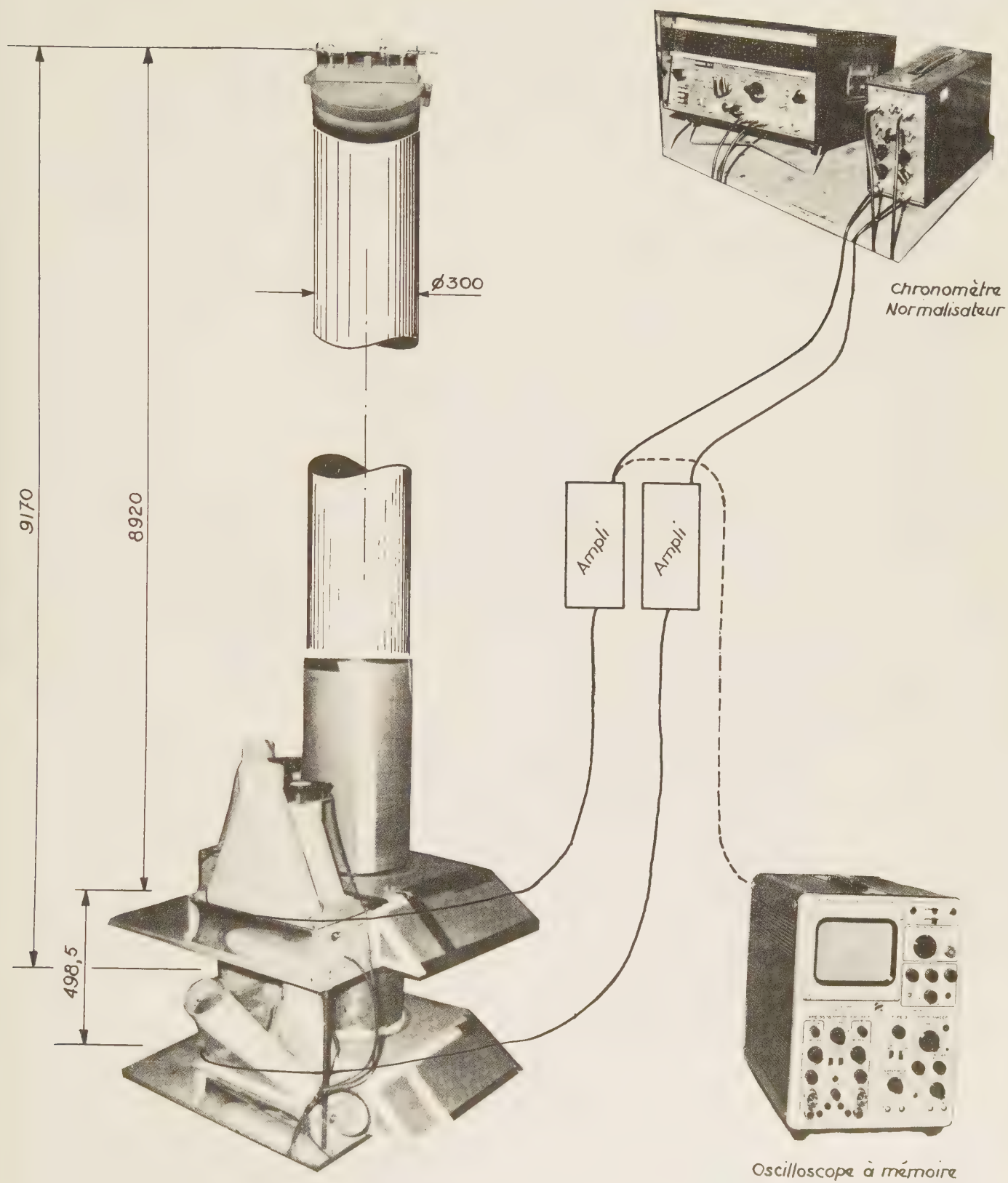


Fig. 9

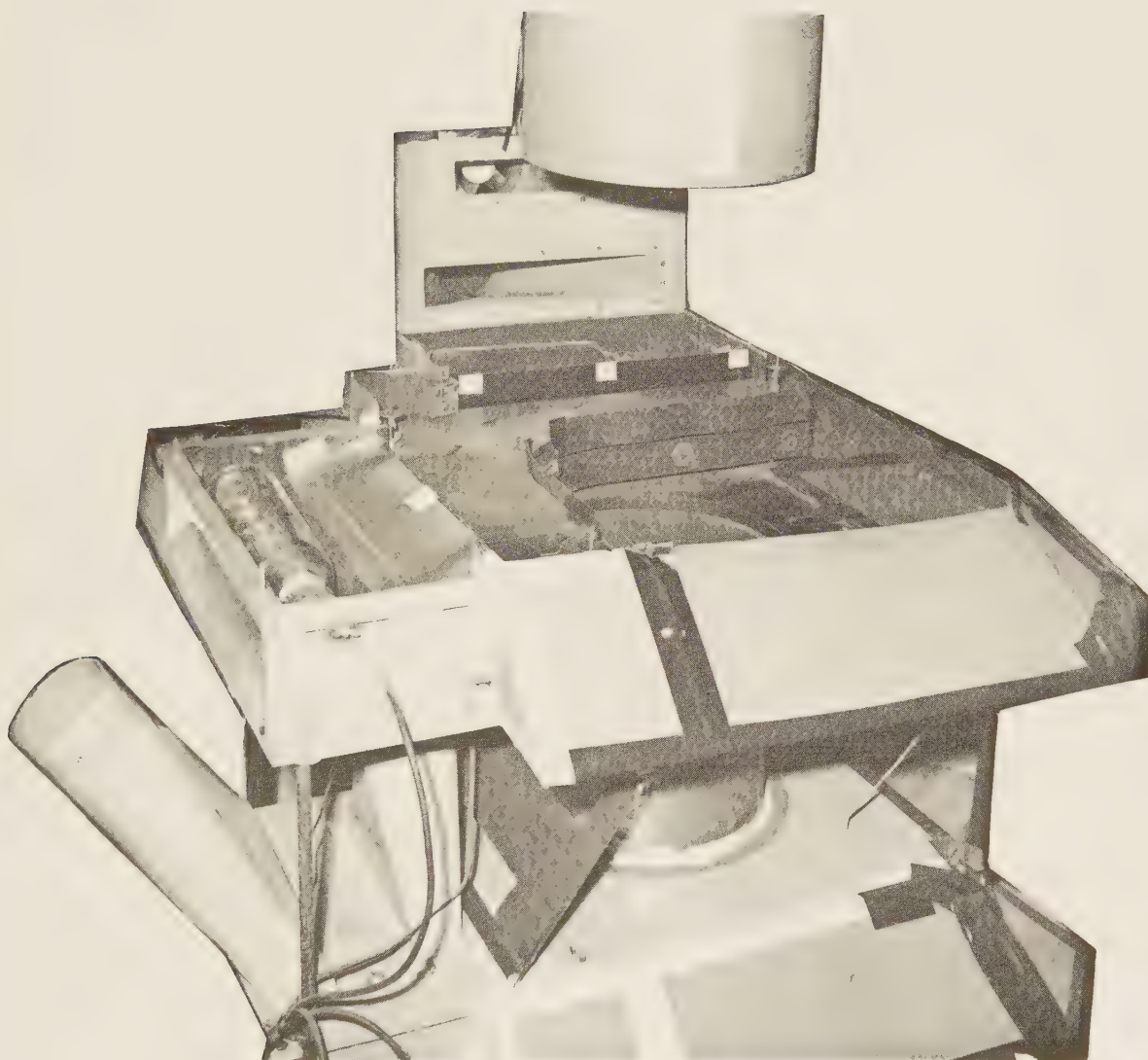


Fig. 10

II.- MISE AU POINT DU SYSTEME DE MESURE

Nous avons d'abord essayé un premier système qui n'a pas donné satisfaction et reconstitué de la manière suivante :

Son principe est présenté sur la figure (11). On obtient un faisceau lumineux presque parallèle à l'aide d'une lentille cylindrique ; dans son plan focal se trouve une lampe argentée en forme de tube d'une puissance de 60 Watts. En face de ce système une autre lentille de même type est placée parallèlement au même niveau à une distance d'une dizaine de cm ; une photodiode est disposée également dans son plan focal. Si un corps quelconque traverse le faisceau lumineux il peut apparaître un changement de tension entre les bornes de la diode, et consécutivement, l'ouverture ou la fermeture d'un circuit. L'utilisation de deux groupes de ce type, disposés à une distance déterminée l'un de l'autre, permettrait la mesure de la durée de passage d'un objet à l'aide d'un chronomètre électronique. Le système décrit ci-dessus a été réalisé comme un modèle préliminaire. On a pu constater ainsi deux faits importants qui nous ont conduit à rechercher un autre système de déclenchement du chronomètre qui soit sûr et efficace. Premièrement, les diodes introduisaient un retard entre le passage et le déclenchement ; deuxièmement la sensibilité de chaque diode n'était pas suffisante pour pouvoir déclencher le chronomètre. Enfin le système ne convenait pas à la mesure de la durée de passage d'un grain pouvant traverser les faisceaux à une vitesse de l'ordre de 10 m/s. C'est la raison pour laquelle nous avons abandonné ce principe de mesure.

A la suite de cette expérience, nous avons recherché un autre système qui soit capable de déclencher le chronomètre avec une rapidité et une précision acceptables. Un modèle dont le schéma est présenté sur la figure (12) a été tout d'abord essayé : deux boîtiers en aluminium sont disposés à 90°, dans chacun de ceux-ci se trouve une lampe de 100 Watts. Le parallélisme est obtenu par un miroir concave placé derrière la lampe. Une photodiode à jonction au germanium est placée sur la bissectrice de l'angle externe non éclairé. Le déclenchement se fait par réflexion de la lumière et non par l'ombre de l'objet ce qui est une meilleure disposition optique et électronique. Les premiers résultats furent peu satisfaisants : le chronomètre ne pouvait être déclenché par des grains de blé mais uniquement par des grains de maïs. Dans le cas des grains de blé en effet le flux lumineux réfléchi ne suffisait pas à obtenir le déclenchement. Il ne s'agissait cependant que d'obtenir une impulsion d'un niveau de crête acceptable. L'épaisseur du faisceau lumineux de ce modèle est de 20 mm. Le système ainsi conçu n'a pas donné satisfaction : en effet, la base de mesure est délimitée par la distance entre deux faisceaux lumineux parallèles distants de

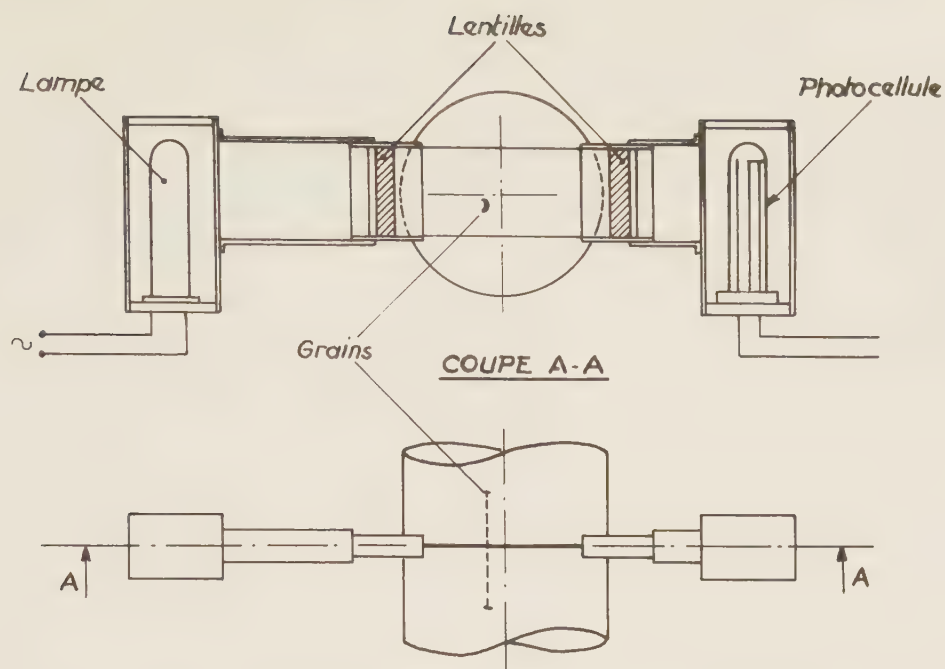


Schéma de principe du 1^{er} modèle

Fig. 11

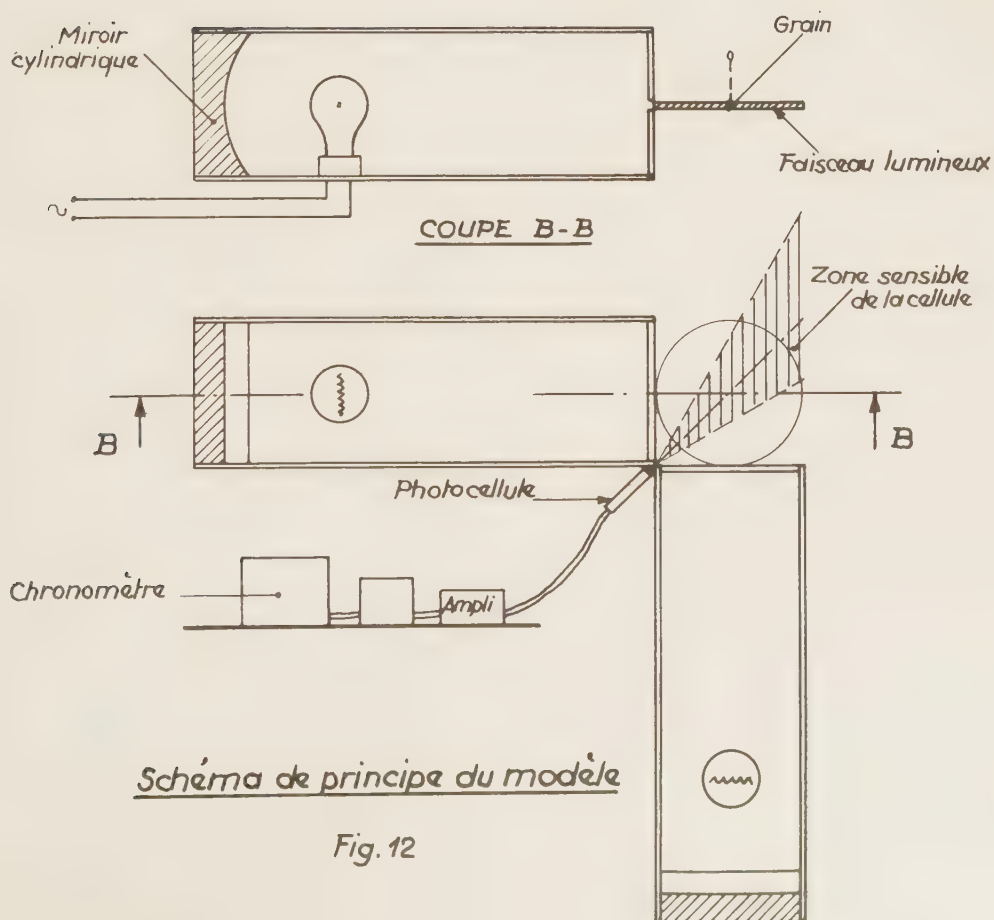


Fig. 12

500 mm environ. Malheureusement les deux faisceaux lumineux ne sont pas infiniment plats ce qui entraîne une incertitude sur la longueur effective de la base. La position du grain qui détermine le déclenchement dans le premier faisceau, ou l'arrêt du chronomètre dans le deuxième faisceau est mal déterminée, une erreur de 8 % paraît inévitable. L'amplification est de l'ordre de 40 fois dans un tel dispositif.

Le problème de refroidissement se pose également, car à partir du moment où la température ambiante atteint ou dépasse 30°C, la cellule perd sa sensibilité et l'essai ne peut être poursuivi.

Ce premier travail nous a cependant amené à mettre en évidence quatre problèmes qu'il nous fallait résoudre pour pouvoir travailler avec une précision convenable dans le cas des grains de blé, ce n'est qu'ensuite qu'il serait possible d'élaborer le système définitif.

- 1.- Diminuer l'épaisseur de faisceau jusqu'à 5 mm au moins.
- 2.- Augmenter la luminance des lampes.
- 3.- Augmenter l'amplification du signal électrique issu des photocellules.
- 4.- Ajouter un système de refroidissement.

Nous devons aussi envisager d'augmenter le nombre des cellules mais ceci avec une certaine inquiétude, nous en parlerons plus tard.

La mise au point de l'optique a été faite sur un modèle réduit à l'échelle 1/5. Il permet de faire aisément les modifications géométriques nécessaires par une opération simple, et la détermination de la disposition optique la plus convenable, par exemple celle de toutes les pièces des boîtiers ou des miroirs concaves et des lampes. On a utilisé une matière plastique susceptible de supporter l'effet de la température et de grosses lampes cylindriques de 500 Watts dont le filament rectiligne a une longueur de 175 mm (Philips type LINEA). La face concave polie du miroir d'aluminium permet d'avoir un faisceau parallèle. Un ventilateur placé sur la pièce supérieure de chacun des boîtiers assure le refroidissement. L'épaisseur de faisceau peut-être adaptée par une fente réglable située entre le boîtier et la zone de passage des corps ; cette pièce transparente empêche, par ailleurs l'entrée de l'air soufflé par le ventilateur dans le tuyau d'essai hermétique (d'un diamètre de 300 mm).

Pour augmenter la valeur du signal électrique de la cellule, nous avons utilisé un pré-amplificateur ayant un gain maximum de 1000. L'impulsion est filtrée par un condensateur et amplifiée 1000 fois avant l'entrée d'un normalisateur de signaux qui l'amplifie encore et la normalise en forme de signal rectangulaire. Ce signal ainsi obtenu aboutit au chronomètre dont le comptage est déclenché par un premier signal correspondant à la rangée haute de cellule et arrêté par le comptage correspondant à la rangée basse.

Nous avons donc un dispositif susceptible de déclencher le chronomètre électronique lors du passage de grains de blé traversant la zone du système éclairée par les deux lampes au voisinage de l'axe de la cellule. Tous les problèmes, sauf celui de la précision semblaient pouvoir être résolus. Dans une première réalisation l'épaisseur du faisceau lumineux ne pouvait pas être diminuée en-dessous de 12 mm dans l'axe du tuyau, ce qui conduisait à une erreur de 4,8 % dans les mesures, erreur qu'un perfectionnement permettra de réduire.

Le principe du système étant ainsi déterminé, on a construit alors un dispositif identique pour le deuxième étage et les pièces nécessaires pour compléter l'installation. Le passage des grains de blé isolés traversant n'importe où les faisceaux lumineux d'une épaisseur de 12 mm (dans le milieu de la section du tuyau d'essai) pouvait donc déclencher ou arrêter le chronomètre. L'erreur demeurerait cependant toujours de 4 %. Un autre phénomène nous a causé des difficultés : les deux bords des faisceaux n'étaient pas nets.

./.

REMARQUE - La diode s'est avérée d'autre part présenter une sensibilité directionnelle. Si l'on s'éloigne de l'axe de la cellule ou de la cellule elle-même la sensibilité diminue, particulièrement à l'extérieur d'un cône ouvert de 20° sur de l'axe optique. Il n'est alors plus possible de déclencher le chronomètre. Il fallait donc, d'une part augmenter l'intensité de la lumière, mais nous étions déjà limités dans cette voie, d'autre part augmenter le nombre des diodes en sorte que la zone sensible couvre toute la surface à explorer. Cinq photodiodes furent donc connectées en parallèle et placées dans la zone d'ombre, pour chaque plan éclairé (figure 13).

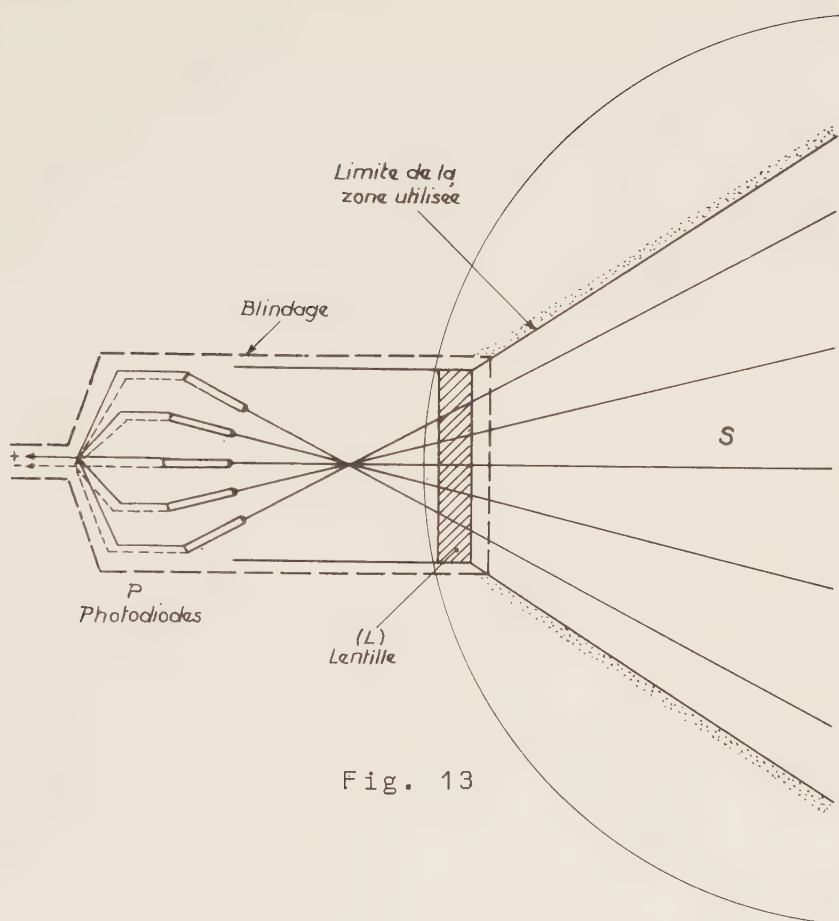


Fig. 13

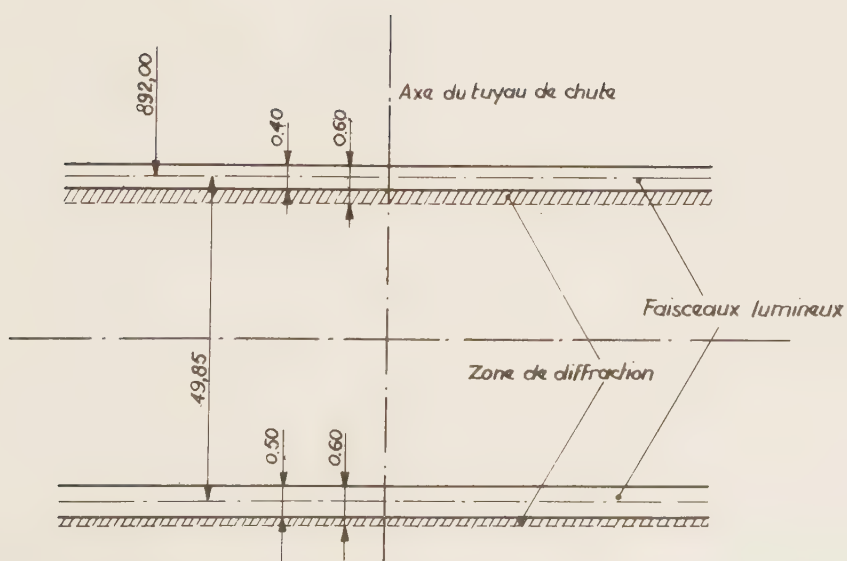


Fig. 14

Il y avait toujours une diffusion à l'origine d'une zone de pénombre entre la zone noire et le faisceau, ceci est cause d'une augmentation de l'erreur. Nous avons trouvé les deux raisons suivantes pour expliquer ce phénomène. Premièrement, le filament de la lampe ne reste pas rectiligne, quelque temps après l'allumage malgré plusieurs points d'attache à des barres de verre il se dilate et se déforme ; deuxièmement, le verre cylindrique de la lampe d'un diamètre de 90 mm joue le rôle d'un miroir concave ; il se crée donc d'autres images du filament. Il faut ajouter que le parallélisme n'était pas parfait.

En déplaçant la lampe nous avons obtenu un faisceau convergent plus intense que le faisceau précédent et dont les rayons se croisent vers le milieu du plan d'essais. En utilisant une lentille de plexiglas de caractéristiques optiques destinés à diminuer l'épaisseur du faisceau et en disposant une plaque de tôle dans laquelle est ménagée une ouverture d'un millimètre au niveau de filament sur une longueur de 300 mm on peut avoir des résultats meilleurs. La plaque est placée juste devant la lampe de façon à ne permettre qu'une image unique du filament, les rayons lumineux d'origine parasite ne peuvent pas passer. Le miroir concave utilisé au début de cette expérience n'était plus utile, aussi l'avons nous supprimé pour ne pas gêner la formation du faisceau. Malgré cette modification qui nous a donné des résultats bien meilleurs mais encore avec une erreur supérieure à 2 %, les deux bords des faisceaux n'étaient pas encore tout à fait nets : la cause paraissait être dû au mauvais réglage en position de la lampe, réglage qu'il aurait fallu obtenir au dixième de millimètre près pour avoir une excellente précision. En tenant compte de l'importance de la délimitation lumière-obscurité pour la partie supérieure du faisceau nous nous sommes attachés à obtenir la netteté des bords supérieurs au détriment de celle des bords inférieurs. La position des faisceaux est présentée sur la figure (14).

Une dernière amélioration du dispositif fut la suivante : une autre lentille convergente de plexiglas de 50 mm de distance focale a été placée devant le groupe des photodiodes à 75 mm de celles-ci de façon telle que l'image de la lumière réfléchie, c'est-à-dire l'image du grain traversant le faisceau, se forme juste sur la ligne des cellules quel que soit le point de passage. Ceci a nettement diminué l'erreur commise, nous en discuterons ultérieurement.

Toutes les difficultés d'origine optique constatées ont été ainsi éliminées peu à peu. L'erreur totale des mesures effectives ne dépasse pas 1 pour cent comme on pourra le constater dans le compte-rendu des expériences. La figure (15) représente le dessin technique de chaque étage du système.

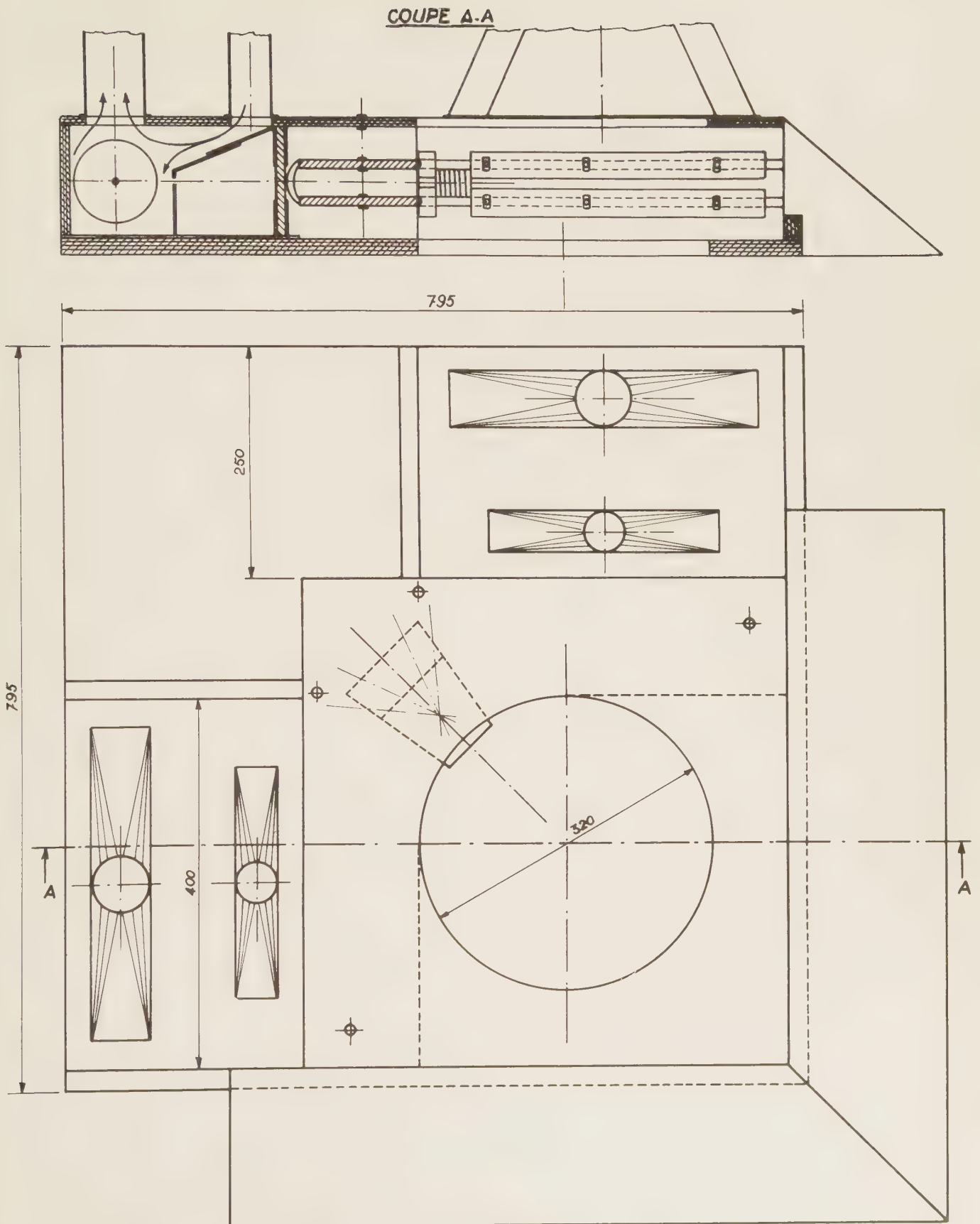


Fig.15

III.- PRECISIONS SUR LE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME

Le schéma de cables de l'installation est présenté sur la figure (16). Le chronomètre (C) se déclenche dès que le normalisateur (N) lui fournit le signal nécessaire.

La normalisation (N) doit recevoir à l'entrée un signal de 300 mv de crête au minimum pour délivrer après amplification et normalisation en forme rectangulaire du signal nécessaire au chronomètre.

Si, à l'entrée du normalisateur, des parasites, et bruits de fond atteignent 300 mv crête, le chronomètre se déclenche sans signal effectif. Il faut donc régler la sensibilité du normalisateur de façon à ne provoquer un déclenchement que pour un signal d'entrée dont l'amplitude dépasse celle de l'impulsion parasite la plus intense qui pourrait se produire.

La première condition à réaliser consiste à réduire tout le long de la chaîne de fonctionnement, l'influence des parasites et des bruits de fond.

Dans ce but :

- . les masses de tous les appareils et accessoires sont reliées entre elles et une des bornes électriques est reliée à la masse générale à partir du boîtier (B).
- . le réglage du zéro du préamplificateur et de la sensibilité du normalisateur est fait aussi souvent que les conditions du moment l'exigent.
- . la liaison des photodiodes du circuit est faite par un câble blindé dont le blindage est relié d'une part aux masses (B) à (C) et d'autre part à un boîtier métallique contenant les photodiodes.

En supposant que les phénomènes parasitaires varient, dans ces conditions, entre 150 et 300 mv crête à l'entrée du normalisateur, il faut que le signal y arrive avec une amplitude bien supérieure à 300 mv crête et en (A) compte-tenu d'un gain moyen de 700, avec une amplitude bien supérieure à 0,43 mv crête.

Reprenons la figure (13). Le plus petit grain ou l'objet tombant dans la zone (S) de détection des photodiodes, à l'endroit le plus défavorable en distance et angle par rapport aux axes des photodiodes, doit réfléchir un éclaircissement tel qu'il produise une impulsion qui compte-tenu du courant total d'obscurité des 5 photodiodes en parallèle et des atténuations probables du circuit dépasse (0,5 - 0,6) mv crête à l'entrée de (A).

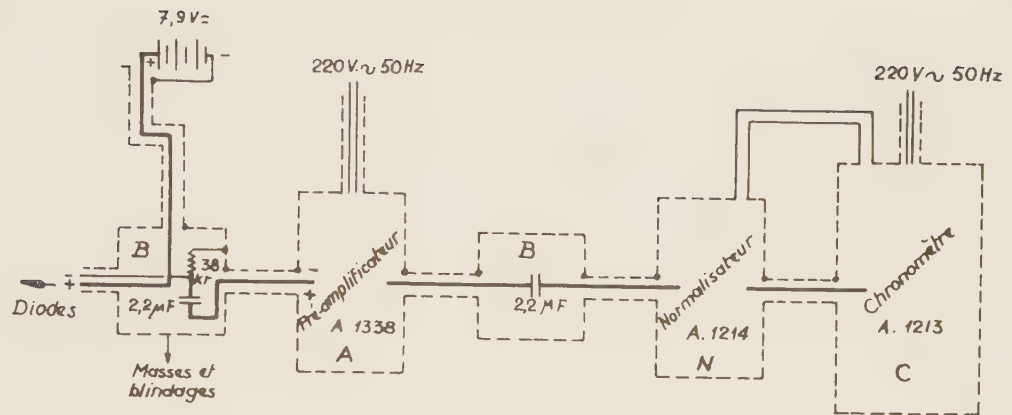


Fig. 16

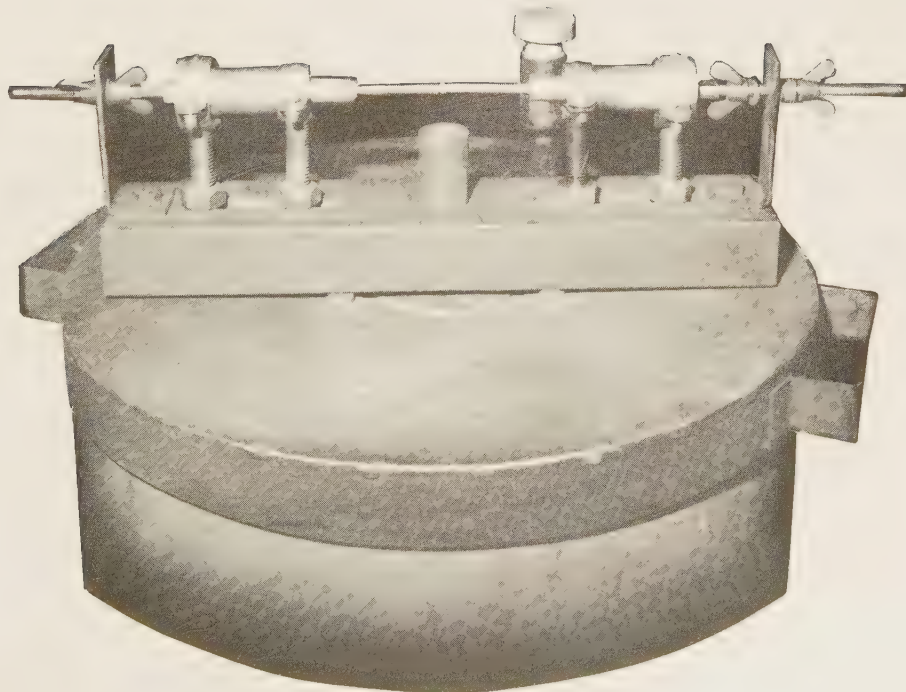


Fig. 17 UN SAC DE NYLON COUVRE
HERMETIQUEMENT L'APPAREIL LORS DES ESSAIS

Dans la zone (S), il faut que l'éclairement soit intense toutefois l'épaisseur des faisceaux lumineux doit être réduite afin que l'éclairement du grain se produise le plus près possible du plan horizontal des photodiodes. Celles-ci en effet doivent répondre lorsque les grains passent à une hauteur définie avec une précision telle que l'erreur ne dépasse pas 2 %.

Pour laisser aux faisceaux lumineux une épaisseur suffisante, une lentille convergente de distance focale de 5 cm a été placée comme nous l'avons exposé à 75 mm des photodiodes. Les rayons réfléchis sont ainsi concentrés sur la ligne des photodiodes sur une épaisseur correspondant à la moitié de la dimension verticale de l'objet quand celui-ci passe dans la région centrale à 15 cm de la lentille et aux 3/4 ou 4/4 de l'épaisseur de l'objet quand celui-ci passe plus près ou plus loin de la lentille. La formule

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$
, donne en effet $h' = 0,5 h$ pour $f = 5$ cm, $p = 15$ cm et $p' = 7,5$ cm.

Il faut également éviter l'échauffement des photodiodes (P) qui diminue leur sensibilité. Les photodiodes sont soustraites partiellement à l'influence de la température des sources de lumière, par isolation thermique et par ventilation. Mais, il est nécessaire d'éteindre les projecteurs durant des intermittences de quelques minutes.

Les 5 photodiodes de chaque étage sont connectées en parallèle et orientées de telle sorte que leurs axes se croisent en formant un angle de (14°) entre eux. Les deux extrêmes forment un angle de (5,5°) avec la droite limitant la zone de détection.

Un grain tombant dans la région comprise entre les zones extrêmes de détection des photodiodes se trouvera sur une droite faisant un angle maximum de (7°) avec l'axe de la photodiode réceptrice et un angle moyen de (7°) avec les axes des deux photodiodes voisines. Seuls les grains tombant dans les deux zones des photodiodes extrêmes pourront se trouver sur une droite faisant un angle de 4° à 5° au maximum avec l'axe d'une seule photodiode.

On avait travaillé d'abord dans une chambre noire et l'on avait pu constater que si quelqu'un bougeait ou touchait les cables de liaison, le chronomètre, très sensible, pouvait se déclencher. Il fallut donc blinder tous les cables de liaison et empêcher la diffusion de faisceaux lumineux venant de l'extérieur. Cependant, si l'on obture la fente qui permet, en chambre noire, le passage de la lumière vers l'extérieur après la zone utile, la proportion de lumière réfléchie venant de l'intérieur augmente et la diode est éclairée par réflexion des parois, par conséquent, la lumière réfléchie en provenance du grain sera inopérante. Bien que toutes les surfaces intérieures ainsi que les pièces de fermetures fussent noircies en mat nous avons dû incliner ces pièces pour diminuer la réflexion parasite.

C.- EXPERIMENTATION

I.- ESSAIS AVEC DES BILLES DE NYLON ISOLEES

Nous avons envisagé de faire d'abord des essais avec des billes de nylon afin de déterminer l'erreur pratique de l'installation de mesure. 100 billes rectifiées à ± 1 % près ont été utilisées pour des diamètres de (2-2,5-3-4-5) mm. La figure (17) représente le système de lâchage d'un grain. Il est destiné à permettre la chute d'un objet sans vitesse initiale. La bille est placée entre les deux tiges horizontales de laiton qui sont soumises à la pression de deux ressorts héliodoïdaux, en serrant l'écrou à oreilles situé sur la partie arrière fileté de la tige on peut écarter les deux extrémités et lâcher le corps sans mouvement de rotation et sans impulsion initiale.

Les résultats obtenus, c'est-à-dire les durées de passage des billes sphériques sont présentées dans le Tableau (IV).

CONDITIONS ATMOSPHERIQUES	DIAMETRES DES BILLES (mm)				
	2	2,5	3	4	5
a (mmHg)	755,74	761,69	753,36	754,24	755,14
s (°C)	18,2	23,3	16	15,8	17,1
h (°C)	14,1	12,5	12,4	13	13,7
(g/cm ³)	$1,1982 \times 10^3$	$1,1903 \times 10^3$	$1,204 \times 10^3$	$1,202 \times 10^3$	$1,202 \times 10^3$
(cm ² /s)	0,1512	0,1546	0,1516	0,1502	0,1506
s (g/cm ³)	1,430	1,091	1,131	1,131	1,131
ombre d'essais	12	20	20	26	26
δt) moyen (10 ⁻⁶ s)	63.903	63.027	57.235	51.415	48.160
ifférence entre es valeurs max. t min. %	0,89	0,76	0,47	0,49	0,58

TABLEAU IV

Dans ce tableau :

t_s = Température sèche

t_h = Température humide

ρ = Masse volumique de l'air

ν = Viscosité cinématique de l'air

ρ_s = Masse volumique des billes

δt = Durée de passage pour 49,85 cm au bout d'une chute de 892 cm.

On peut constater que l'erreur totale de mesure est toujours inférieure à 1 pour cent, même pour les billes de 2 mm pour lesquelles l'écart est le plus grand. Il arrive parfois que des ratés se produisent pour les petites billes mais par contre cet incident est moins fréquent pour les autres.

L'influence de la différence entre les diamètres des billes rectifiées ± 1 % ne joue pas un rôle important. En effet les résultats obtenus lors de plusieurs lâchages de la même bille indiquent que la différence entre les valeurs extrêmes est toujours inférieure à 1 % de la durée de passage.

II.- CALCUL THEORIQUE DE LA DUREE DE PASSAGE

Reprenons l'équation de la chute libre d'un corps sphérique dans l'air immobile sous l'action de la pesanteur (1, p. 150, 1967). En négligeant la poussée d'Archimède l'équation s'écrit :

$$\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_s \frac{dv}{dt} = - \frac{1}{2} \rho C_T v^2 \pi R^2 + \frac{4}{3} \pi R^3 g \rho_s \quad (10)$$

Cette approximation est du même ordre de grandeur que celle qui consiste à considérer qu'à chaque instant le coefficient

de trainée à la même valeur que dans le cas de mouvement uniforme (1, p. 151, 1967).

Si l'on choisit les variables sans dimensions :

$$x_+ = \frac{x}{R} , \quad v_+ = \frac{2Rv}{v} , \quad t_+ = \frac{v}{2R^2} t$$

On obtient :

$$\frac{dv_+}{dt_+} = - \frac{3}{8} \frac{\rho}{\rho_s} v_+^2 C_T + \frac{4 R^3 g}{v^2} \quad (11)$$

La vitesse réduite v_+ est un nombre de Reynolds $Re = \frac{2Rv}{v}$. Si le coefficient C_T était constant on pourrait facilement intégrer l'équation différentielle ce qui aboutirait à une courbe en Th.

($v = \frac{1}{\sqrt{C}} \text{Th} (A \sqrt{C}) t$). Ce n'est pas le cas, en effet, les valeurs C_T varient et ne sont connues que par une courbe semi-empirique $C_T(v_+)$. Le calcul de la vitesse limite, et l'intégration de l'équation ne peuvent se faire que par procédé graphique. Parmi les méthodes utilisables nous avons utilisé de préférence la méthode des trapèzes donnant une erreur de l'ordre de 1 millième, ce qui était déjà suffisant pour nos calculs et permettait l'utilisation de différents intervalles particulièrement convenables.

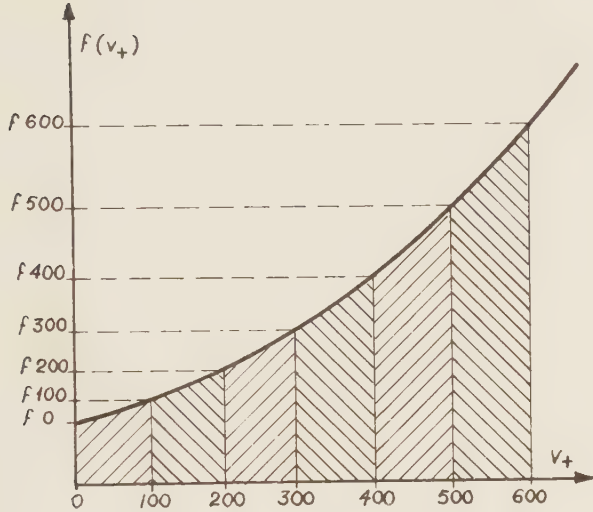
En vue de l'application de cette méthode l'équation (11) peut s'écrire sous la forme suivante (1, p. 151, 1967) :

$$\frac{dt_+}{dv_+} = \frac{1}{\frac{4 R^3 g}{v^2} - \frac{3}{8} \frac{\rho}{\rho_s} v_+^2 C_T (v_+)} = f (v_+) \quad (12)$$

La bille ayant une vitesse initiale nulle on a :

$$t_+ = \int_0^{v_+} f (\xi) d\xi$$

On peut calculer $f(v_+)$ pour les valeurs $v_+ = 0, 100, 200, \dots$ à condition que, chaque fois, on utilise les valeurs numériques de C_T données par la courbe $C_T = f(v_+)$ pour chaque valeurs de v_+ . L'application de cette méthode se fait donc de la manière suivante :



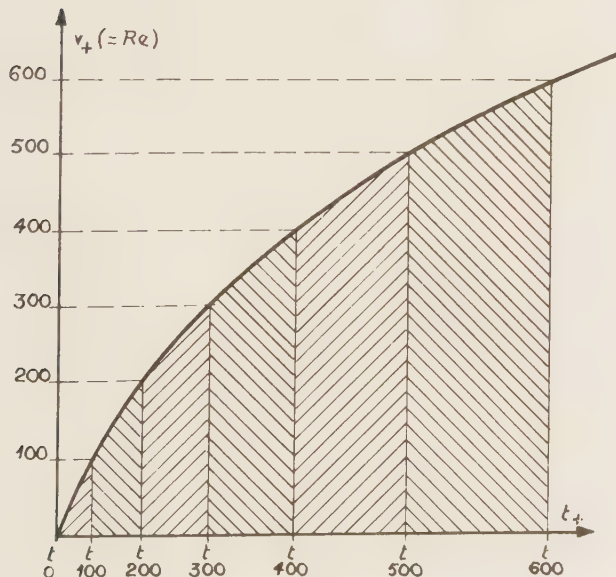
$$dt_+ = f(v_+) dv_+$$

$$t_{100} = (100-0) \left(\frac{f(100)+f(0)}{2} \right)$$

$$t_{200} = t_{100} + \left(\frac{200-100}{2} \right) (f(100)+f(200))$$

$$t_{300} = t_{200} + \left(\frac{300-200}{2} \right) (f(200)+f(300))$$

Dans ces calculs à l'approche de la hauteur correspondant au faisceau lumineux, nous avons utilisé des intervalles de 10 même quelquefois de 1 pour pouvoir parvenir aux valeurs de t correspondantes exactes. Le même principe a été utilisé pour le calcul de x_+ .



$$dx_+ = v_+ dt_+$$

$$x_{100} = 100 \frac{1}{2} (t_{100} - t_0)$$

$$x_{200} = x_{100} + \left(\frac{100+200}{2} \right) (t_{200} - t_{100})$$

$$x_{300} = x_{200} + \left(\frac{200+300}{2} \right) (t_{300} - t_{200})$$

Les valeurs de C_T utilisées dans les calculs sont présentées dans le tableau (V).

v_+	C_T	v_+	C_T	v_+	C_T	v_+	C_T	v_+	C_T
10	4,400	210	0,758	410	0,592	610	0,528	820	0,488
20	2,800	220	0,740	420	0,588	620	0,525	850	0,485
30	2,200	230	0,730	430	0,584	630	0,522	900	0,480
40	1,850	240	0,718	440	0,580	640	0,520	960	0,470
50	1,630	250	0,706	450	0,576	650	0,518	1050	0,460
60	1,460	260	0,695	460	0,572	660	0,516	1200	0,452
70	1,340	270	0,685	470	0,568	670	0,514	1300	0,445
80	1,240	280	0,677	480	0,564	680	0,512	1400	0,440
90	1,180	290	0,668	490	0,561	690	0,510	1500	0,435
120	1,100	300	0,660	500	0,558	700	0,508	1600	0,430
110	1,030	310	0,650	510	0,554	710	0,506	1700	0,428
120	0,990	320	0,643	520	0,550	720	0,504	1800	0,425
130	0,950	330	0,638	530	0,548	730	0,502	1900	0,422
140	0,910	340	0,630	540	0,545	740	0,500	2000	0,420
150	0,880	350	0,624	550	0,542	750	0,498	2600	0,410
160	0,850	360	0,618	560	0,540	760	0,496	2800	0,408
170	0,830	370	0,612	570	0,538	770	0,494	2900	0,406
180	0,810	380	0,608	580	0,534	780	0,492	3000	0,402
190	0,790	390	0,602	590	0,532	790	0,491	3100	0,400
200	0,772	400	0,600	600	0,530	800	0,490	5000	0,400

TABLEAU V

Ces chiffres ont été tirés des ouvrages (1-2-4-7) donnant la courbe (C_T-v_+).

A titre d'exemple le calcul théorique ci-dessous est détaillé pour les billes de 3 mm dans le tableau (VI).

$$R = 1,5 \text{ mm} \quad v = 0,1502 \text{ cm}^2/\text{s} \quad \rho = 1,202 \cdot 10^3 \text{ g/cm}^3$$

$$g = 980,914 \text{ cm/s}^2 \text{ (pour ANTONY)} \quad \rho_s = 1,131 \text{ g/cm}^3$$

v_+	C_T	$f(v_+)$	t_+	x_+	$x \text{ (cm)}$	$v \text{ (cm/s)}$	$t \text{ (s)}$
100	1,100	0,001749	0,17406	8,703	1,305	50,53	0,051657
200	0,772	0,001773	0,35003	35,098	5,264	101,06	0,103901
300	0,660	0,001810	0,52904	79,851	11,977	151,60	0,157037
400	0,600	0,001859	0,71229	143,988	21,598	202,13	0,211432
500	0,558	0,001921	0,90109	228,948	34,342	252,66	0,267474
600	0,530	0,002000	1,09691	336,649	50,497	303,20	0,325600
700	0,508	0,002097	1,30151	469,639	70,445	353,73	0,386332
800	0,490	0,002217	1,51689	631,174	94,676	404,26	0,450264
900	0,480	0,002375	1,74622	826,105	123,915	454,80	0,518337
1000	0,470	0,002574	1,99330	1060,822	159,123	505,33	0,591679
1100	0,460	0,002825	2,26274	1343,734	201,560	555,86	0,671657
1200	0,452	0,003161	2,56129	1687,066	253,059	606,40	0,760277
1300	0,445	0,003624	2,89933	2109,616	316,442	656,93	0,860613
1400	0,440	0,004312	3,29389	2642,272	396,340	707,46	0,977738
1500	0,435	0,005392	3,77491	3339,751	500,962	758,00	1,120521
1600	0,430	0,007313	4,40075	4309,498	646,424	808,53	1,306291
1610	0,430	0,007620	4,47527	4429,408	664,411	813,58	1,328411
1620	0,430	0,007956	4,55298	4554,909	683,236	818,64	1,351478
1630	0,430	0,008325	4,63421	4686,908	703,036	823,69	1,375590
1640	0,430	0,008733	4,71931	4826,047	723,907	828,74	1,400850
1650	0,430	0,009186	4,80868	4973,060	745,959	833,80	1,427378
1660	0,430	0,009692	4,90282	5128,862	769,274	838,85	1,455322
1670	0,430	0,010261	5,00230	5294,496	794,174	843,91	1,484851
1680	0,430	0,010904	5,10779	5471,192	820,678	848,96	1,516164
1690	0,430	0,011638	5,22012	5660,468	849,070	854,01	1,549508
1700	0,428	0,012134	5,33868	5861,427	879,214	859,06	1,584700
1701	0,428	0,012220	5,35085	5882,134	882,320	859,57	1,588315
1702	0,428	0,012307	5,36312	5903,000	885,450	860,07	1,591955
1703	0,428	0,012396	5,37547	5924,029	888,604	860,58	1,595621
1704	0,428	0,012486	5,38791	5945,222	891,783	861,08	1,599314
1705	0,428	0,012578	5,40044	5966,583	894,987	861,59	1,603034
1710	0,428	0,013057	5,46414	6075,336	911,300	864,12	1,621941
1720	0,428	0,014139	5,59953	6307,530	946,129	869,17	1,662129
1730	0,428	0,015425	5,74663	6561,278	984,191	874,22	1,705793
1740	0,428	0,016977	5,90775	6840,821	1026,123	879,28	1,753619
1800	0,426	0,039684	7,38366	9459,113	1418,867	909,60	2,191719
1810	0,425	0,049097	7,82084	10248,223	1537,233	914,65	2,321489
1820	0,425	0,070378	8,39661	11293,246	1693,986	919,70	2,492397
1830	0,425	0,124740	9,29877	12939,688	1940,953	924,76	2,760168
1840	0,425	0,558698	11,56868	17104,936	2562,740	929,81	3,433968
1842,8	0,425	23,886130	17,40000	27842,...	4176,...	331,22	5,16....

TABLEAU VI

Dès que les valeurs x tendent vers l'infini, la vitesse correspondante a été considérée comme étant la vitesse limite. Le calcul de la vitesse limite pourrait également être fait par l'intersection de la courbe $(C_T - v_+)$ et de la courbe logarithmique de l'équation (11) pour $(dv_+/dt_+) \rightarrow 0$.

En utilisant le tableau (V) le même calcul a été fait pour chaque groupe de billes dont nous disposions. Les résultats obtenus, soit plus précisément ceux là qui nous intéressent, sont rassemblés dans le tableau (VII).

		Diamètres des billes (mm)			
		2	3	4	5
durée de passage expérimentale moyenne pour $b = 49,85$ cm	$\Delta\delta$ (10^6 s) ex.	63903	57235	51415	48160
durée de passage théorique pour $49,85$ cm	$\Delta\delta$ (10^6 s) théo.	63699	57523	51748	48465
différence entre les résultats théoriques et expérimentaux	$\epsilon\delta$ %	0,31	0,69	0,64	0,63
vitesse théorique pour une auteur de chute de 917 cm *	v (cm/s) théo.	784,98	864,79	982,70	1027,95
vitesse expérimentale pour la même hauteur de chute : $\frac{b}{\delta t}$ (vitesse moyenne)	v (cm/s) ex.	780,09	870,98	969,56	1035,03
vitesse limite théorique	v_L (cm/s)	823,81	931,22	1104,57	1241,12
rapport de la vitesse théorique à la vitesse limite (1)	$(v_{théo}/v_L)\%$	95,28	92,86	87,15	82,82
rapport de la vitesse expérimentale à la vitesse limite (2)	$(v_{ex}/v_L)\%$	94,69	93,53	87,77	83,39
différence (1) - (2)	Δv %	-0,59	+0,67	+0,62	+0,57
vitesse théorique pour la auteur de chute de 892 cm (entrée de la base)	v_{892} (cm/s)	782,83	861,11	956,77	1020,29
durée totale théorique de chute pour la hauteur de chute de 892 cm	t (ms)	1771	1597	1525	1486

Hauteur correspondant au milieu de la base.

TABLEAU VII

Il est intéressant de voir que la vitesse théorique est plus élevée que la vitesse expérimentale, pour des billes de 2 mm contrairement à ce qui se passe pour des billes de diamètre plus grand ce qui explique que les valeurs C_T utilisées dans nos calculs donnent des résultats moins satisfaisants pour les petits diamètres que pour les grands.

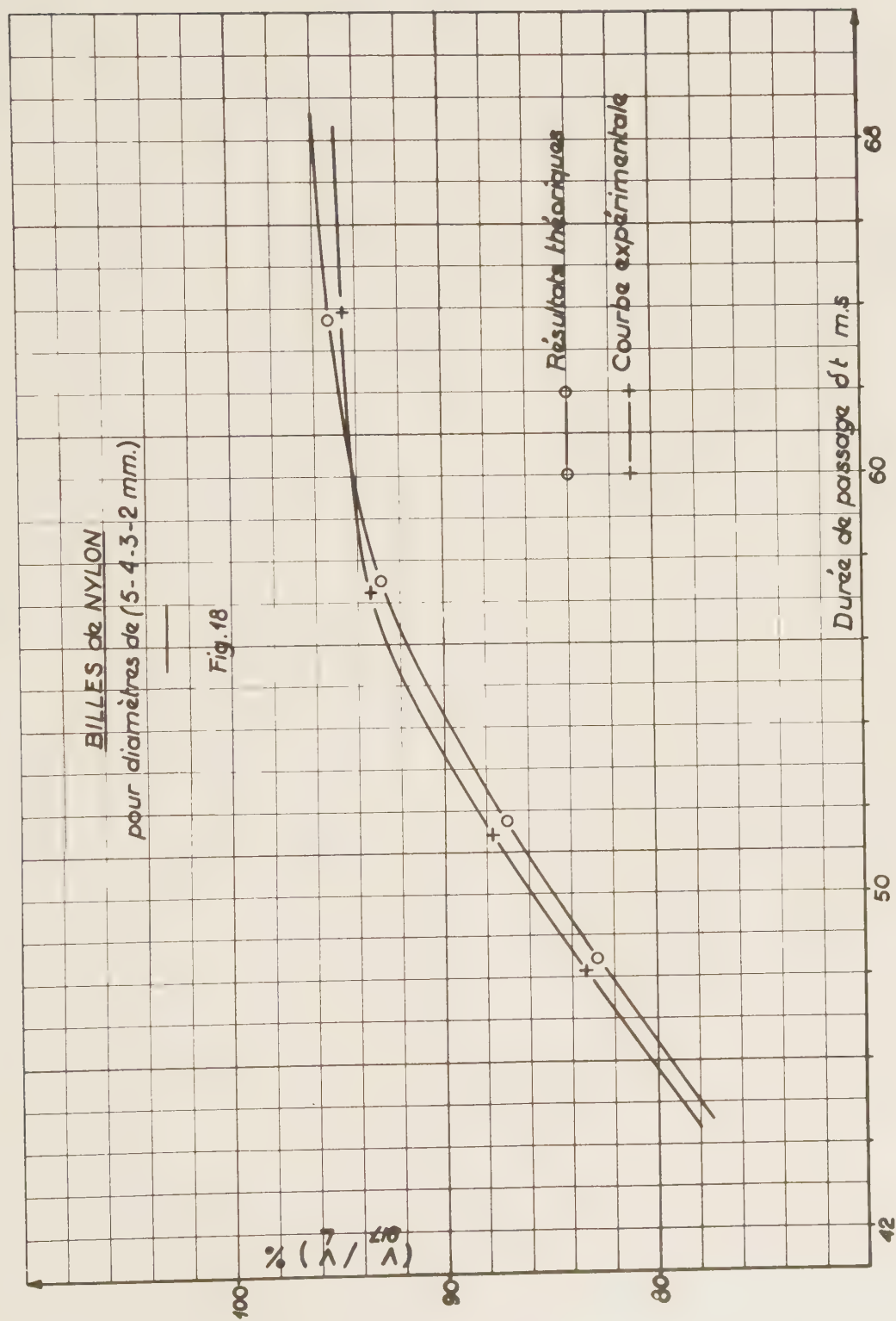
D'après ce tableau on peut constater que notre installation de mesure, y compris le système de lâchage, donne des résultats comparables aux résultats théoriques à un pour cent près. Ceci est confirmé par les essais de cinq types de billes. La figure (18) représente graphiquement la position des résultats théoriques et expérimentaux.

III.- ESSAIS AVEC DES GRAINS ISOLÉS

1.- Echantillonnage

Cinq variétés de semence de blé 1968 fournies par une maison de semence spécialisée ont été prises comme échantillon. Ce sont CAPITOLE (blés d'hiver), PROGRESS et REX (blés de printemps), MOISSON et TOPAZE (blés d'hiver). Deux cents grammes de chacun de ces variétés ont été prélevés par diviseur dichotomique. Pour tenir compte des dimensions et de la forme différente des grains de blé on a procédé à un tamisage à l'aide des tamis standards conformes aux Normes Françaises afin de les grouper par classes. Ces tamis sont utilisés dans le commerce. La quantité de grain restant sur chaque tamis est indiquée dans le tableau (VIII). La quantité restant sur chaque tamis a été divisée en deux, dichotomiquement avec le même appareil, jusqu'à obtenir un nombre de l'ordre de 150 grains pour chaque essai.

Nous avons aussi déterminé les caractéristiques physiques de ces échantillons, les résultats sont indiqués dans le tableau (VIII).



VARIETES	Masse volumique (g/cm ³)					Moyenne
	Diamètre de Tamis (mm)					
	2,5	3	3,15	3,5	4	
CAPITOLE	-	-	1,409	1,403	1,429	1,414
PROGRESS	1,429	1,416	1,408	1,432	-	1,421
REX	1,406	1,402	1,415	1,425	1,424	1,414
MOISSON	-	-	1,418	1,378	1,402	1,399
TOPAZE	-	1,428	1,429	1,430	1,434	1,430
Reste en % du poids sur chaque tamis						Quantité (gr)
CAPITOLE	-	1,01	4,21	52,47	42,45	200
PROGRESS	2,5	20,29	40,42	37,01	0,15	200
REX	1,11	8,07	23,9	57,87	8,11	200
MOISSON	-	-	5	63,86	30,91	200
TOPAZE	-	3,71	21,70	65,40	9,18	200
Humidité en %			Dimensions (mm)			
			l ₁	l ₂	h	
CAPITOLE	11,52		6,80	3,78	2,92	
PROGRESS	9,69		6,61	3,16	2,85	
REX	11,44		5,60	3,44	2,89	
MOISSON	11,80		6,32	3,84	3,01	
TOPAZE	11,46		6,71	3,58	2,94	
l ₁ = Longueur - l ₂ = Largeur - h = Hauteur (face ventrale à face dorsale)						

TABLEAU VIII

2.- Mesures et calculs

Les mesures ont été réalisées pour un nombre minimum de 100 grains de chaque tamis ce qui a nécessité 2000 essais.

La figure (18) représente la courbe expérimentale obtenue de la durée de passage et du rapport de la vitesse atteinte v au

bout d'une chute de 917 cm à la vitesse limite v_L . Les deux courbes (fig. 18) sont très voisines (- de 1%) ce qui constitue un excellent test de l'installation.

Pour chaque densité de bille (et conditions atmosphériques) on pourrait tracer deux courbes analogues (1 théorique - 1 expérimentale). Nous supposons qu'elles seraient décalées en ordonnée de la même façon en valeur relative.

Pour des grains de blé géométriquement semblables et de densité donnée on pourrait tracer de la même façon : une courbe expérimentale et une courbe théorique si nous savions intégrer le mouvement de la chute (variation de C_T avec v_+). Nous ferons l'hypothèse que les courbes correspondantes sont confondues, c'est-à-dire que pour un δt donné, la bille et le grain de blé ont le même rapport (v_{917}/v_L), soit théorique, soit expérimental.

Les courbes théoriques qui suivront ont été tracées pour des sphères de diamètres : (1,8-2-2,4-2,8-3,4) ce qui donnait un meilleur étalement des points. D'après la figure 18, le réseau expérimental doit être un peu différent du précédent (fig. 19 à 23).

Le tableau (IX) représente les valeurs tirées de ces calculs.

	Diamètres des billes équivalentes (mm)				
	1,8	2	2,4	2,8	3,4
CAPITOLE (Tamise de 3,15 et de 4) $\rho = 1,176 \times 10^3 \text{ g/cm}^3$ $v = 0,1567 \text{ cm}^2/\text{s}$					
$(v_{917}/v_L) \%$	97,28	95,01	92,68	89,89	85,91
Durée de passage δt (ms)	66,96	63,32	57,95	54,36	50,86
Durée totale de chute t (ms)	1725	1675	1610	1561	1516
CAPITOLE (Tamis de 3,5 et de 3) $\rho = 1200 \times 10^3 \text{ g/cm}^3$ $v = 0,1521 \text{ cm}^2/\text{s}$					
$(v_{917}/v_L) \%$	97,45	95,41	93,24	90,51	86,44
δt (ms)	87,81	64,06	58,54	54,86	51,26
t (ms)	1732	1684	1614	1566	1520

TABLEAU IX

	Diamètres des billes équivalentes (mm)				
	1,8	2	2,4	2,8	3,4
PROGRESS Tamise de 3 mm) $\rho = 1,197 \times 10^3 \text{ g/cm}^3$ $v = 0,1527 \text{ cm}^2/\text{s}$					
v_{917}/v_L %	97,86	95,26	97,07	90,42	86,19
δt (ms)	67,40	63,80	58,30	54,60	51,10
t (ms)	1729	1687	1611	1564	1518
PROGRESS Tamis de 3,15 et de 3,5) $\rho = 1,208 \times 10^3 \text{ g/cm}^3$ $v = 0,1509 \text{ cm}^2/\text{s}$					
v_{917}/v_L %	97,08	95,35	93,18	90,55	86,36
δt (ms)	67,60	63,90	58,40	54,70	51,80
t (ms)	1731	1684	1612	1565	1519
EX (Tamis de 3 - ,15 et de 4) $\rho = 1,206 \times 10^3 \text{ g/cm}^3$ $v = 0,1498 \text{ cm}^2/\text{s}$					
v_{917}/v_L %	97,12	95,46	93,35	90,61	86,43
δt (ms)	67,60	63,90	58,40	54,70	49,20
t (ms)	1731	1681	1612	1565	1519
MOISSON Tamis de 3 et de 3,15) $\rho = 1,182 \times 10^3 \text{ g/cm}^3$ $v = 0,1546 \text{ cm}^2/\text{s}$					
v_{917}/v_L %	97,37	95,04	92,82	90,05	85,91
δt (ms)	69,00	63,50	58,00	54,40	50,90
t (ms)	1725	1680	1608	1561	1516
MOISSON Tamis de 3,5 et de 4) $\rho = 1,184 \times 10^3 \text{ g/cm}^3$ $v = 0,1545 \text{ cm}^2/\text{s}$					
v_{917}/v_L %	97,49	95,25	93,09	90,39	86,44
δt (ms)	67,70	63,70	58,40	54,80	51,00
t (ms)	1735	1689	1615	1567	1520

TABEAU IX (suite)

	Diamètres des billes équivalentes (mm)				
	1,8	2	2,4	2,8	3,4
TOPAZE (Tamis de 3,15 et de 3,5) $\rho = 1,211 \times 10^3 \text{ g/cm}^3$ $\nu = 0,1502 \text{ cm}^2/\text{s}$					
$(v_{917}/v_L) \%$	97,08	95,35	92,91	90,40	86,30
$\delta t \text{ (ms)}$	67,50	63,80	58,50	54,70	51,10
$t \text{ (ms)}$	1729	1682	1610	1564	1519
TOPAZE (Tamis de 4) $\rho = 1,195 \times 10^3 \text{ g/cm}^3$ $\nu = 0,1516 \text{ cm}^2/\text{s}$					
$(v_{917}/v_L) \%$	96,95	95,15	92,92	90,11	85,96
$\delta t \text{ (ms)}$	67,00	63,40	58,00	54,40	50,90
$t \text{ (ms)}$	1723	1677	1607	1561	1515

TABLEAU IX (fin)

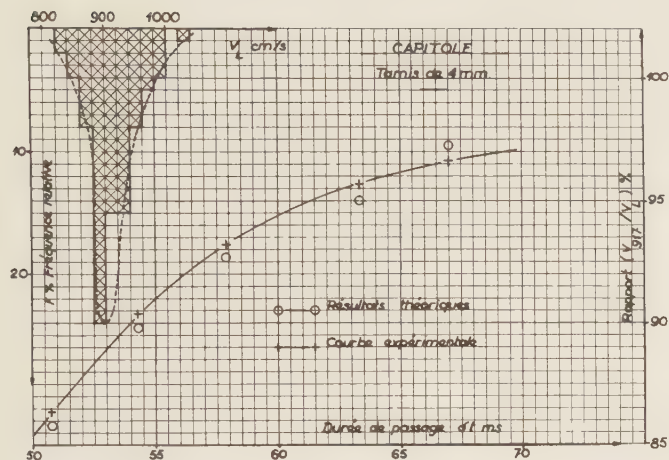
Dans le tableau :

ρ : masse volumique de l'air
 ν : viscosité cinématique de l'air
 (v_{917}/v_L) : rapport de la vitesse atteinte pour 917cm à la vitesse limite
 δt : durée de passage entre les deux faisceaux lumineux
 t : durée totale pour la chute de 892 cm

Pour chaque tamis on prend 100 grains en principe identiques, en réalité présentant de légères différences. Ces différences se traduisent par une certaine dispersion dans les δt mesurées, et dans les vitesses limites v_L qu'on peut en déduire d'après la courbe b expérimentale correspondante.

On peut donc tracer la courbe de répartition donnant la fréquence relative en fonction de v_L (c'est la courbe qui figure en haut à gauche dans les graphiques n° 19 à 23).

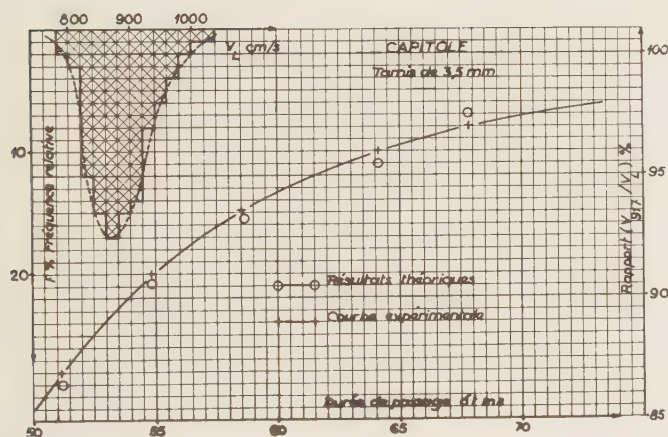
DISPERSION DES VITESSES LIMITES CONCERNANT DES GRAINS ISOLES.



$v_{\min}$: 823 cm/s

$v_{\max}$: 1024 cm/s

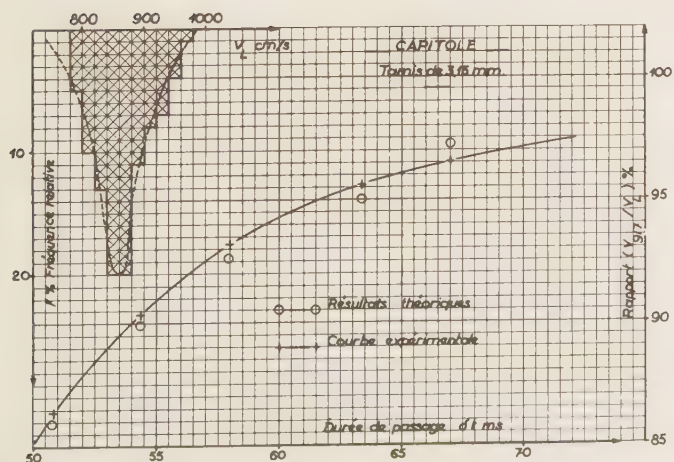
v_{moy} : 918 cm/s



$v_{\min}$: 779 cm/s

$v_{\max}$: 1044 cm/s

v_{moy} : 897 cm/s



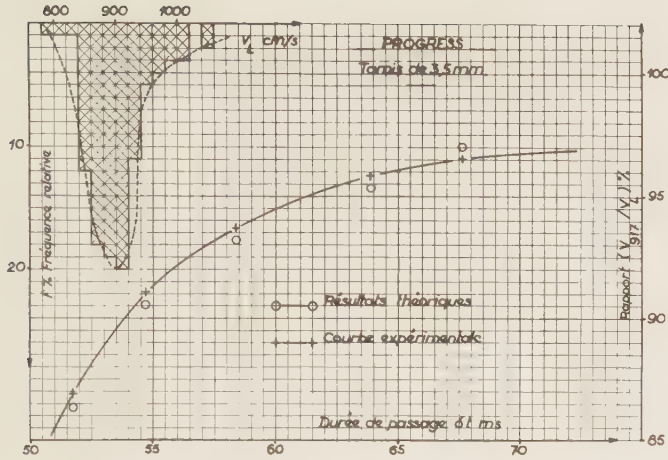
$v_{\min}$: 787 cm/s

$v_{\max}$: 969 cm/s

v_{moy} : 868 cm/s

Fig. 19

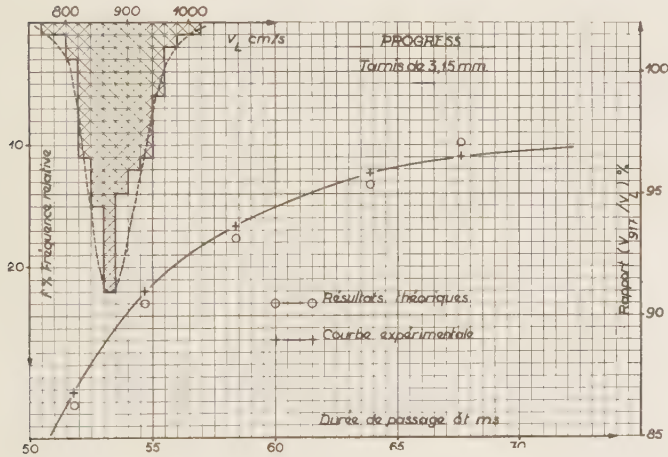
DISPERSION DES VITESSES LIMITES CONCERNANT DES GRAINS ISOLÉS.



$v_{\min}$: 796 cm/s

$v_{\max}$: 1059 cm/s

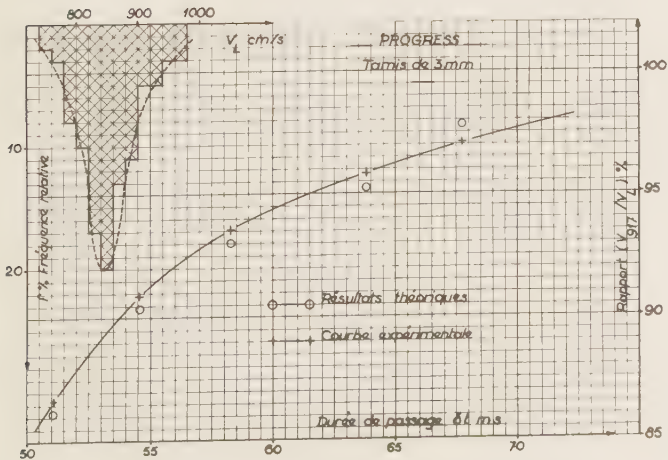
v_{moy} : 904 cm/s



$v_{\min}$: 767 cm/s

$v_{\max}$: 1016 cm/s

v_{moy} : 883 cm/s



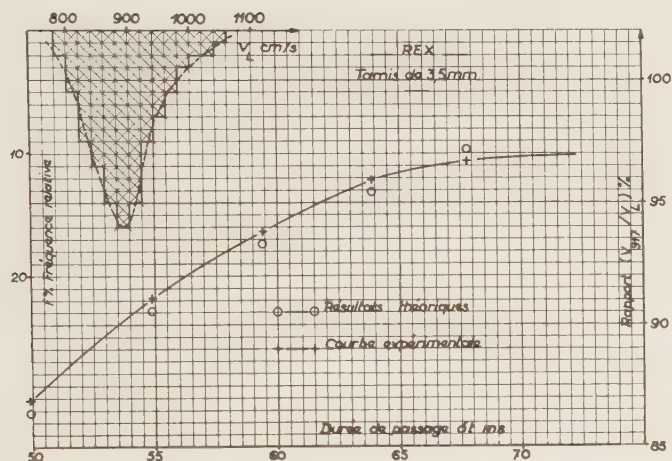
$v_{\min}$: 745 cm/s

$v_{\max}$: 972 cm/s

v_{moy} : 854 cm/s

Fig. 20

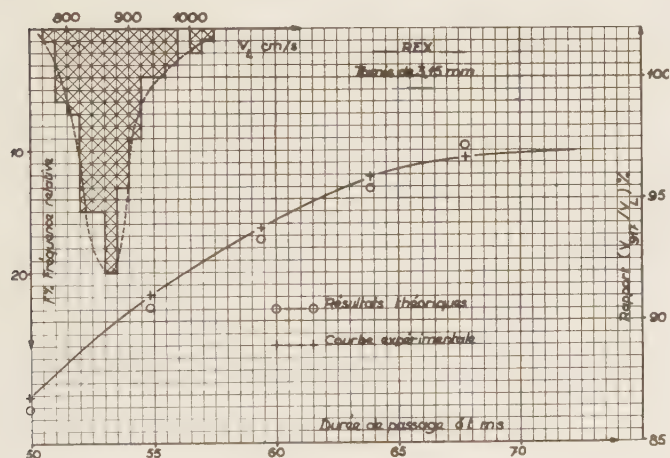
DISPERSION DES VITESSES LIMITES CONCERNANT DES GRAINS ISOLES.



v_{min} : 793 cm/s

v_{max} : 1048 cm/s

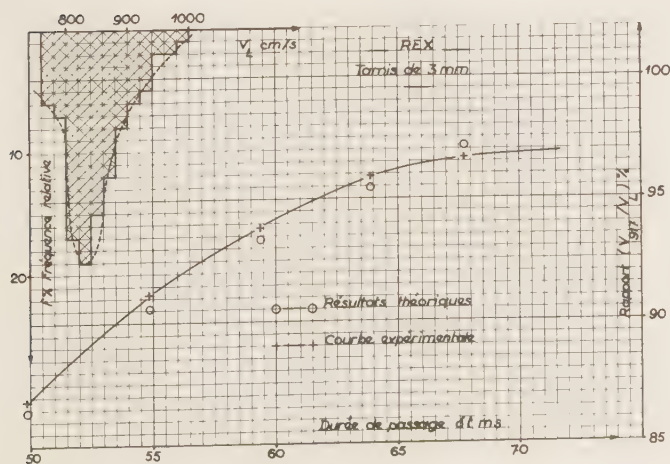
v_{moy} : 901 cm/s



v_{min} : 776 cm/s

v_{max} : 1038 cm/s

v_{moy} : 876 cm/s



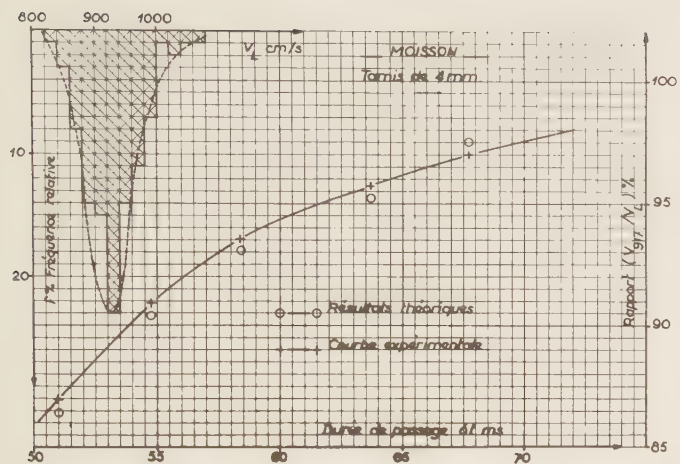
v_{min} : 760 cm/s

v_{max} : 994 cm/s

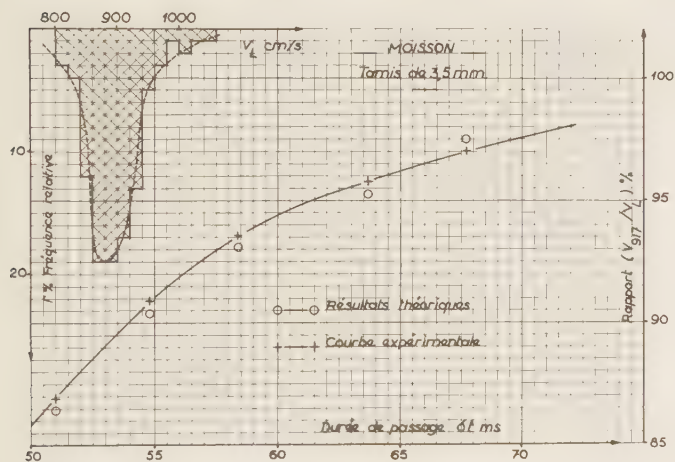
v_{moy} : 852 cm/s

Fig. 21

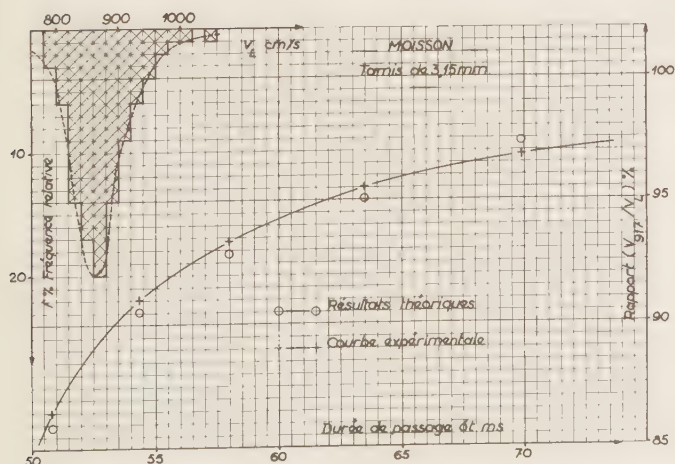
DISPERSION DES VITESSES LIMITES CONCERNANT DES GRAINS ISOLÉS.



$v_{\min}$: 831 cm/s
 $v_{\max}$: 1070 cm/s
 v_{moy} : 930 cm/s



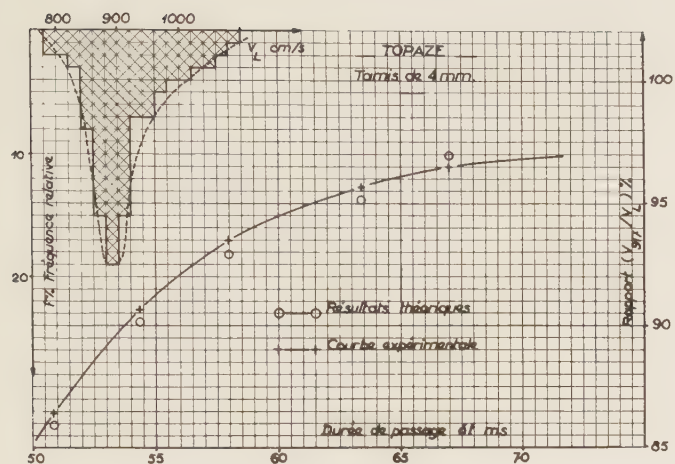
$v_{\min}$: 813 cm/s
 $v_{\max}$: 1053 cm/s
 v_{moy} : 896 cm/s



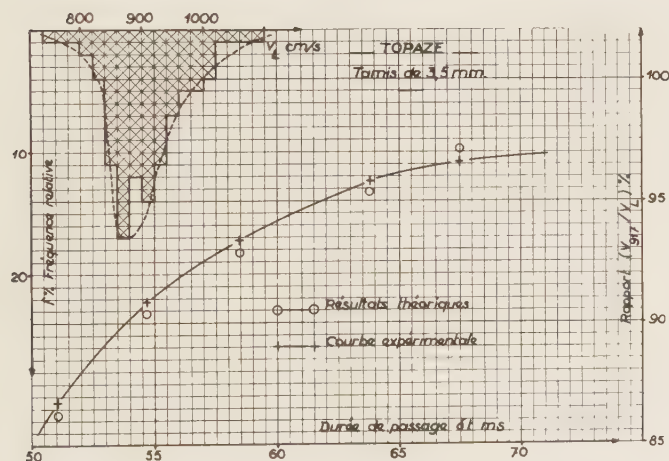
$v_{\min}$: 774 cm/s
 $v_{\max}$: 1041 cm/s
 v_{moy} : 856 cm/s

Fig. 22

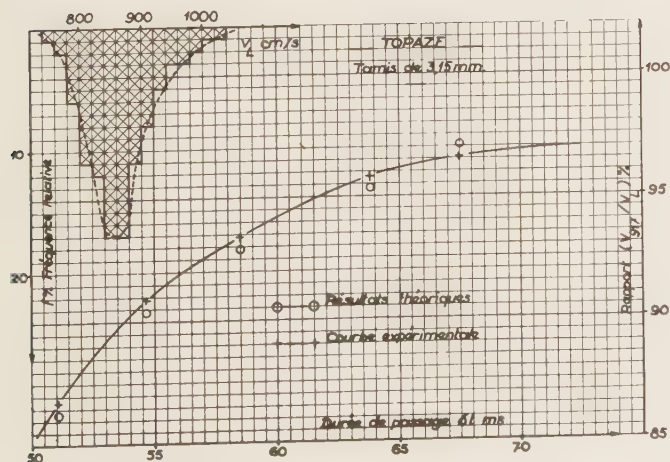
DISPERSION DES VITESSES LIMITES CONCERNANT DES GRAINS ISOLES.



$v_{\min}$: 790 cm/s
 $v_{\max}$: 1091 cm/s
 v_{moy} : 916 cm/s



$v_{\min}$: 759 cm/s
 $v_{\max}$: 1085 cm/s
 v_{moy} : 907 cm/s



$v_{\min}$: 740 cm/s
 $v_{\max}$: 1037 cm/s
 v_{moy} : 867 cm/s

Fig. 23

Les figures (19 - 20 - 21 - 22 - 23) représentent les courbes des rapports relatifs de la vitesse atteinte à la vitesse limite pour les billes fictives correspondant aux grains ainsi que la dispersion des vitesses limites des grains obtenues par extrapolation pour chaque durée de passage.

IV.- ESSAIS EN ESSAIM

1.- Mise au point d'un système de lâchage des grains en essaim

Si on place un oscilloscope à la place du chronomètre dans des essais correspondant à des grains isolés le signal provoqué par l'entrée des grains dans le faisceau lumineux se présente sur l'écran comme un trait vertical du spot. Si l'on lâche plusieurs grains il apparaîtra plusieurs traits selon l'ordre de passage. Partant de cette idée nous avons effectué tout d'abord des essais préliminaires. Un essaim de grains a été lâché par coulissement d'une plaque horizontale. Lorsque les grains parviennent au niveau de 892 cm l'écran a figuré une série de traits. En tenant compte de l'épaisseur du faisceau lumineux soit 5 mm et de la vitesse atteinte du grain (de l'ordre de 1000 cm/s) ainsi que la faible luminence du spot il est bien évident que la prise de vues pose un grand problème. Toutefois, en utilisant un oscilloscope à mémoire, l'image du spot demeure sur l'écran pendant un temps suffisant. Nous avons pu prendre des photographies des inscriptions apparaissant sur l'écran. Il restait à trouver un système de lâchage tel qu'on puisse laisser tomber un certain nombre des grains en même temps et du même niveau, sans vitesse initiale. Le système que nous avons choisi paraît le plus convenable. Deux plaques de plexiglas sont percées en correspondance de 100 trous. Celle de dessus est fixe, l'autre peut glisser sur deux glissières latérales ; la plaque mobile est décalée de 4 mm par rapport à l'autre pour placer les objets à lâcher et ensuite écartée de 4 mm par un électro-aimant. Tous les trous se trouvent alors exactement en coïncidence et dans les mêmes conditions. En réalisant des trous de diamètres convenables pour chaque diamètre de billes, ou pour chaque tamis, on peut lâcher toute sorte de billes ou de grains avec une précision convenable. Il est certain que l'usinage de ces plaques demande un travail délicat et soigneux. On a réalisé cinq plaques différentes dont les diamètres de trous sont de (3,3 - 3,5 - 4 - 4,5 - 5,5) mm. Le réglage se fait facilement par des écrous à oreilles.

La vue de cet appareillage est présentée sur la figure (24).

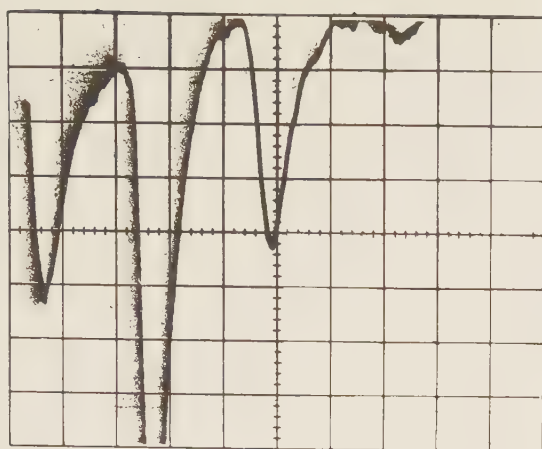
2.- Essais préliminaires avec des billes de nylon

Nous avons effectué une série d'essais avec des billes de nylon afin de pouvoir déterminer l'ordre de grandeur de l'erreur qui pourrait être commise avec ce système de lâchage. Les trois billes de 5, de 4 et de 3,175 mm ayant été placées dans les positions différentes vers le milieu de la plaque il a été réalisé plusieurs essais. Ces positions et les photos des inscriptions pour les billes de 5 et de 3,175 mm sont présentées sur les figures (25-26). Les photos ne comportant pas les trois trajets ont été supprimées et l'on a tiré une valeur moyenne des bonnes photos, valeur choisie comme la moyenne entre les instants extrêmes de passage. On trouve une durée moyenne de 7 ms dans les premières dispositions pour les billes de 5 mm, c'est-à-dire pour les trois billes lâchées à partir des trous les plus éloignés. On peut alors considérer que la durée entre la première et la dernière inscription représente l'erreur de mesure. D'après le calcul théorique nous avons une durée totale de 1485,3 ms pour une chute de 892 cm ; l'erreur ne dépasse donc pas 1 pour cent. S'il s'agit de l'étude de leur ordre d'entrée dans le faisceau, c'est-à-dire de la comparaison de cette durée (7 ms) à l'intervalle de dispersion des moments de passage qui est par exemple de l'ordre de 200 ms pour un essaim de grains de blé, l'erreur atteint alors 7/200 soit 3,5 pour cent. Si nous examinons de près le calcul théorique de la chute libre d'une bille correspondant à un grain isolé, à partir du repos, au bout d'une chute de 1,15 millimètre il s'est écoulé 15,3 milliseconde, (cf. tableau ci-dessous), c'est-à-dire, que dans le cas de chute en essaim, s'il y a un grain qui a un départ retardé de 1,15 mm par rapport aux autres, comme ce décalage de temps demeurera jusqu'au bout (à moins bien sûr qu'il n'y ait d'autres facteurs entrant en jeu) nous aurons a priori une différence de temps de 15,3 ms à l'entrée dans le faisceau de cellules, et une erreur de 1 pour cent sur la durée totale. Si l'on admet d'un intervalle de temps de 200 ms environ entre le passage du premier et du dernier grain, cette erreur représente 7 pour cent de cette valeur.

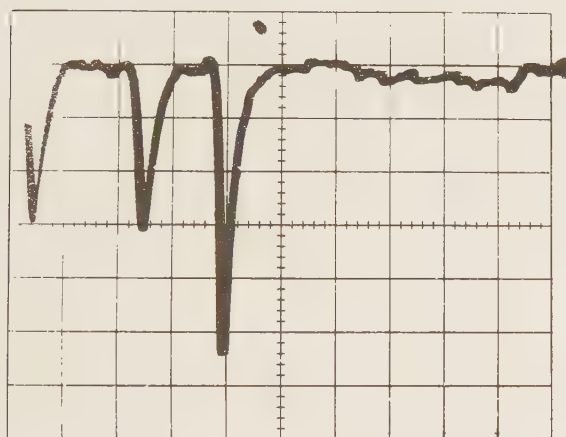
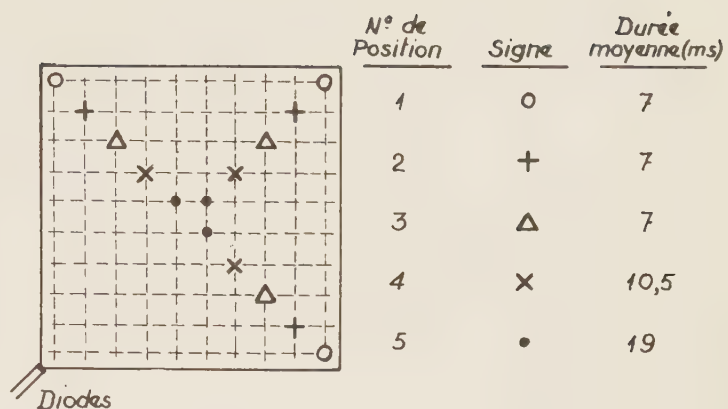
$$d = 5 \text{ mm} \quad g = 980,914 \text{ cm/s}^2$$

$$\rho_s = 1,131 \text{ g/cm}^3 \quad v = 0,1502 \text{ cm}^2/\text{s} \quad \rho = 1,202 \times 10^3 \text{ g/cm}^3$$

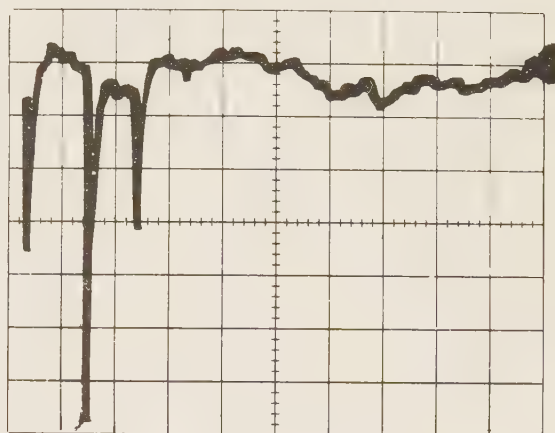
v_+	$C_T (v_+)$	$f (v_+)$	t_+	x_+	$x \text{ (mm)}$	$v \text{ (cm/s)}$	$t \text{ (ms)}$
10	4,40	0,000368	0,003679	0,018395	0,04599	3,004	3,061
20	2,80	"	0,007359	0,073595	0,18399	6,008	6,124
30	2,20	"	0,011039	0,185595	0,41399	9,012	9,186
40	1,85	"	0,014720	0,294430	0,73608	12,016	12,250
50	1,63	"	0,018401	0,460075	1,15019	15,020	15,314



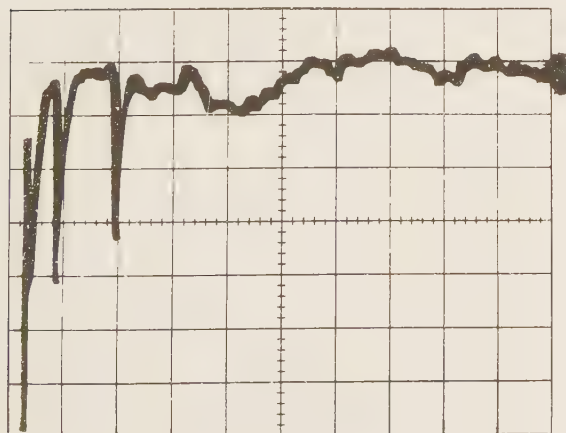
1.- 1 ms/div - 0,1 V/div



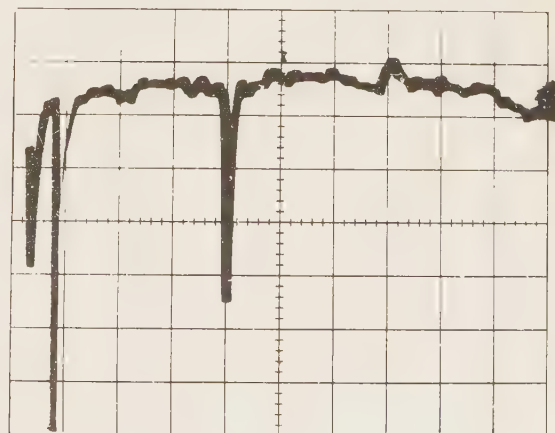
2.- 2 ms/div - 0,2 V/div



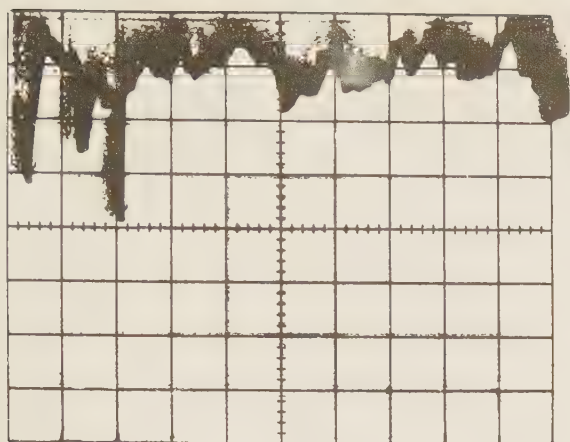
4.- 5 ms/div - 0,2 V/div



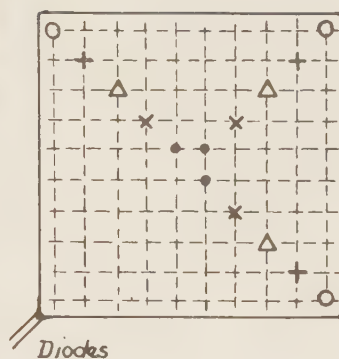
3.- 5 ms/div - 0,2 V/div



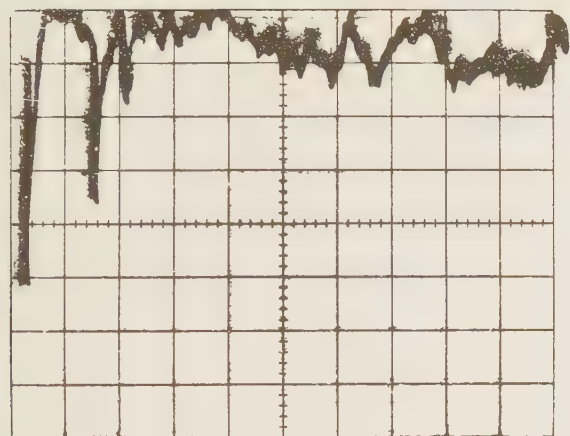
5.- 5 ms/div - 0,2 V/div



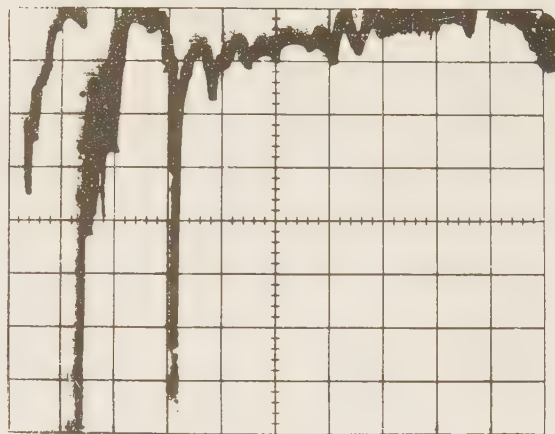
1.- 5 ms/div - 0,1 V/div



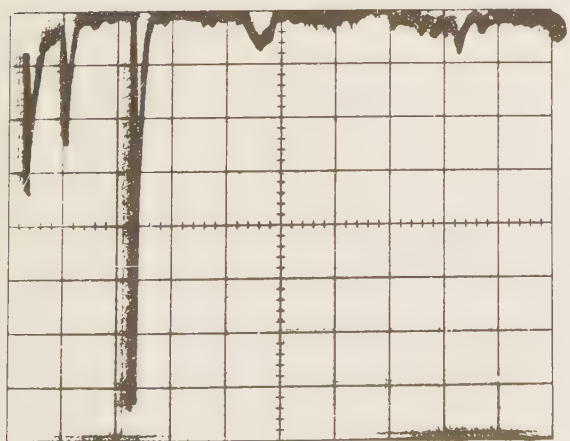
N° de Position	Signe	Durée moyenne (ms)
1	O	13
2	+	13
3	Δ	13
4	x	13
5	•	14,5



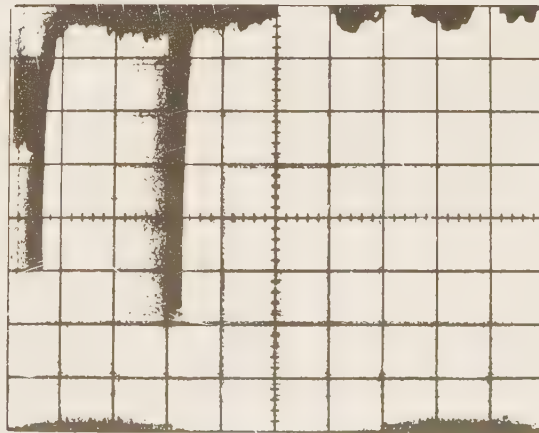
2.- 5 ms/div - 0,1 V/div



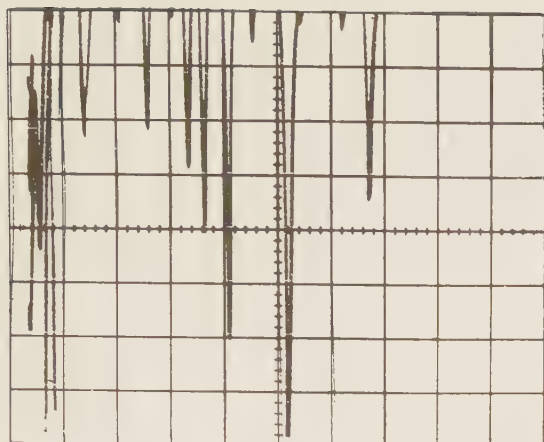
4.- 5 ms/div - 0,1 V/div



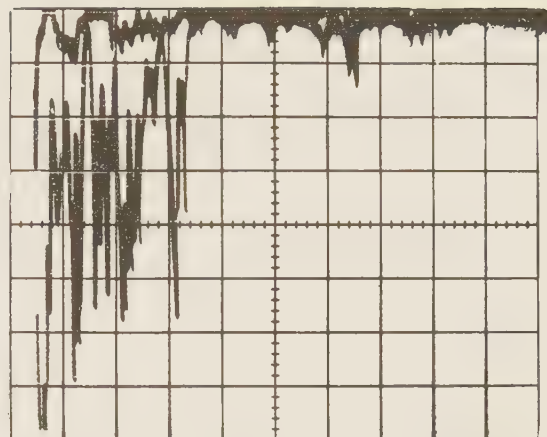
3.- 5 ms/div - 0,2 V/div



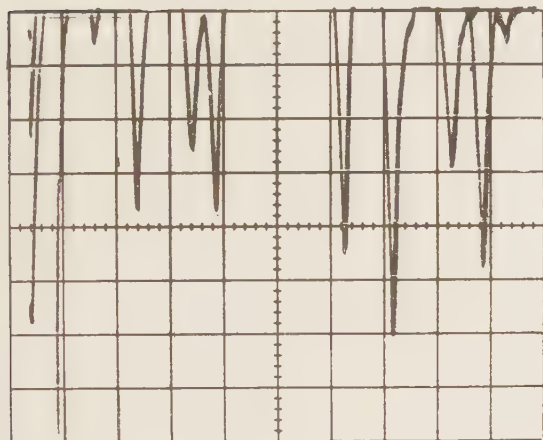
5.- 5 ms/div - 0,1 V/div



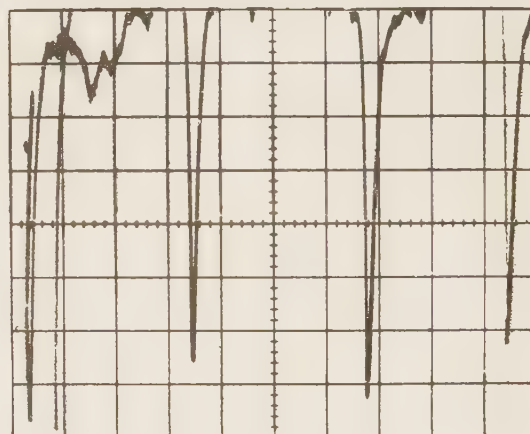
1.- 20 billes de 4 mm
4,5 ms/div ($\Delta T = 27$ ms)



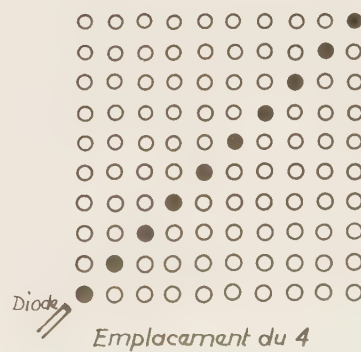
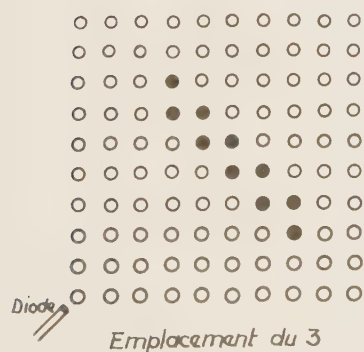
2.- 60 billes de 4 mm
10 ms/div ($\Delta T = 30$ ms)



3.- 10 billes de 4 mm
3,5 ms/div ($\Delta T = 33$ ms)



4.- 10 billes de 4 mm
3,5 ms/div ($\Delta T = 31$ ms)

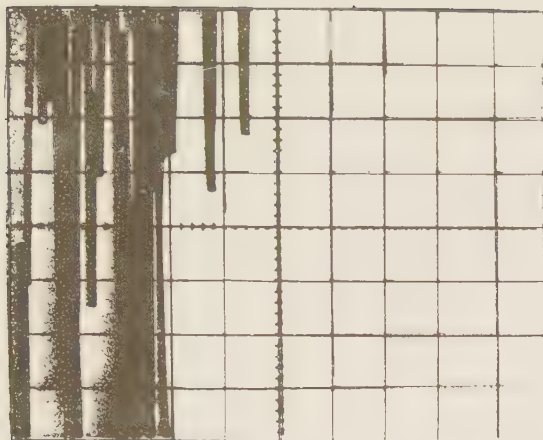


En tenant compte de la différence entre les diamètres des billes rectifiées $\pm 1\%$, nous avons intégré l'équation de la chute libre pour le diamètre de 5,05 mm. Le temps de chute pour (0-892) cm est 1481,7 milliseconde. La différence est 3,6 ms par rapport à celle de 5 mm. En supposant le même écart pour les billes ayant le diamètre de 4,95 mm une erreur de 7,2 ms apparaît sur la chute de (0-892) cm. Les résultats obtenus sur la figure (25) nous donnent une moyenne d'écart de 7 ms dans les positions les plus éloignées. On peut dire alors que cette erreur est causée par l'inégalité des diamètres et explique le bon fonctionnement de l'appareil de lâchage.

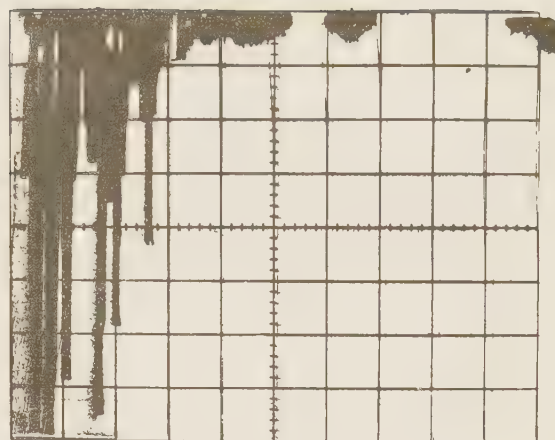
Si l'on groupe les billes vers le milieu de la plaque (5ème position) l'écart moyen de la durée entre la première et la dernière inscription est augmenté ce qui s'explique par l'interaction des billes. La différence moyenne des durées entre la première et la dernière inscription est alors de l'ordre de 20 ms dans le cas des positions les plus approchées, autrement dit que la 5ème position. Si, dans une position analogue à celle-ci, on augmente le nombre de billes, la durée de dispersion atteint une valeur de l'ordre de 30 ms et reste presque invariable même avec un nombre de 60 billes. La figure (27) représente ces résultats. Pour un essaim de 10 billes cette durée de dispersion est déjà de l'ordre de 30 ms et presque égale à celle de la population de 60 billes.

Nous avons voulu aussi savoir ce qui se passerait lors du lâchage de deux types différents de billes en essaim. Nous avons fait diverses combinaisons, par exemple les billes de 5 mm avec les billes de 3 mm, 4 et 3,175, 3 et 3,175, 4 , 3,175 et 3 mm.

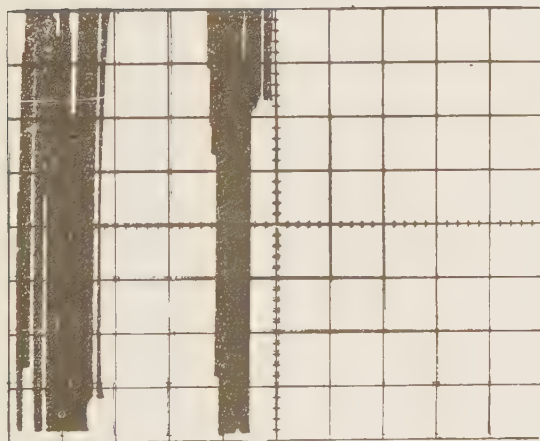
D'après les photos de ces essais, présentées sur les figures (28-29) on a pu constater que les deux groupes de billes se sont séparés sauf ceux de 3 et de 3,175 mm. La confusion des signaux qu'on a observés dans ce dernier cas n'est probablement pas due aux phénomènes d'interactions entre les deux groupes (qui n'ont pas de raison d'être plus grands que dans les autres cas), mais simplement au fait que les temps de chute de chaque groupe correspondent à des domaines de dispersion qui se recouvrent largement. En effet en portant en abscisse la durée totale pour 892 cm et le diamètre des billes en ordonné on peut, d'après les résultats du tableau (VII) former une courbe (durée - diamètre) et en déduire par interpolation la durée totale pour les billes de 3 et de 3,175 mm. Ce sont 1597 ms et 1585 ms. Si les deux billes tombaient isolément et sans interaction l'écart de durée devrait être de 12 ms. En tenant compte de la dispersion de 30 ms des billes tombant en essaim il est normal qu'elles se présentent sur l'écran de l'oscilloscope avec des inscriptions se chevauchant.



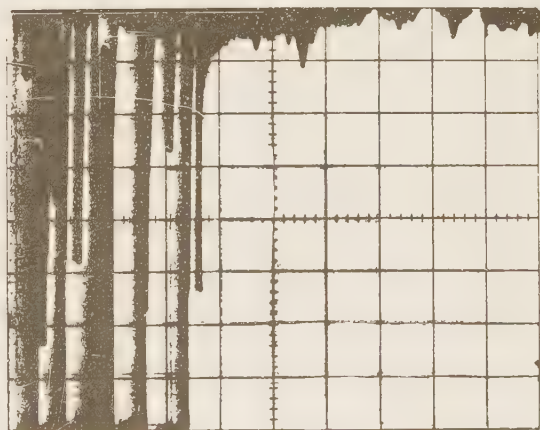
50 billes de 5 mm
Balayage : 10 ms/div
Amplitude : 0,2 V/div



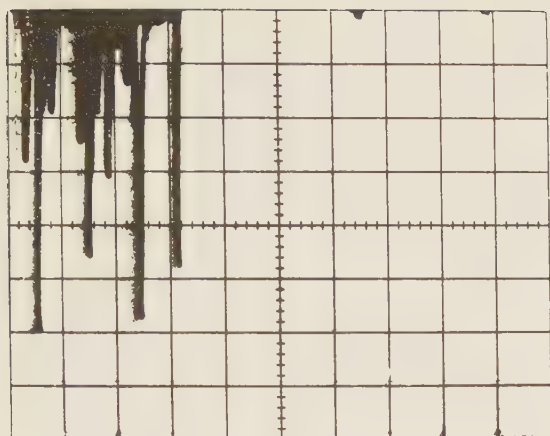
50 billes de 3 mm
Balayage : 10 ms/div
Amplitude : 0,1 V/div



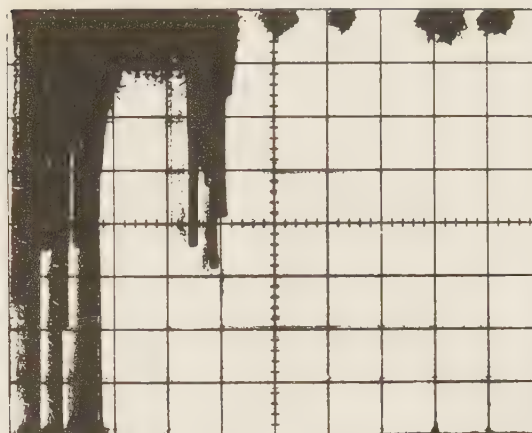
50 billes de 5 mm et
50 billes de 3 mm
Balayage : 35 ms/div
Amplitude : 0,1 V/div



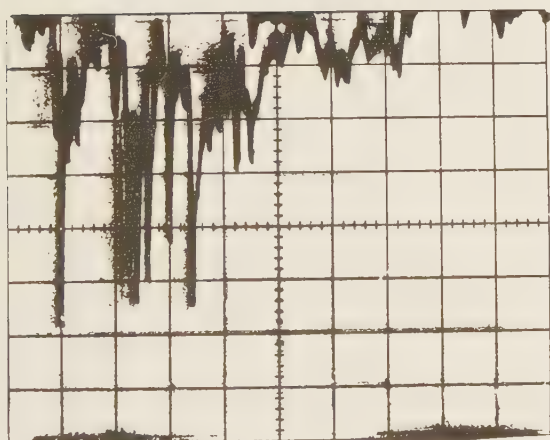
25 billes de 4 mm
Balayage : 10 ms/div
Amplitude : 0,1 V/div



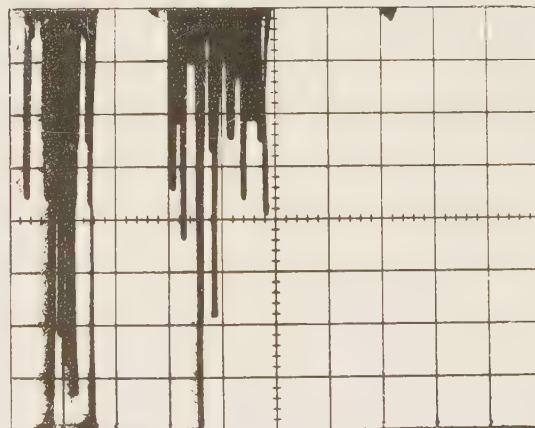
25 billes de 3,175 mm
Balayage : 10 ms/div
Amplitude : 0,1 V/div



25 billes de 4 mm
25 billes de 3,175 mm
Balayage : 20 ms/div
Amplitude : 0,1 V/div



25 billes de 3,175 mm
25 billes de 3 mm
Balayage : 10 ms/div
Amplitude : 0,1 V/div



25 billes de 4 mm
25 billes de 3,175 mm
25 billes de 3 mm
Balayage : 20 ms/div
Amplitude : 0,1 V/div

Fig. 29

3.- Essais avec des grains de blé en essaim

D'après les valeurs du tableau (IX) on peut tracer deux courbes différentes sur le même graphique pour chaque groupe de grains étudié :

- I.- Courbe $f(t)$ donnant le temps de chute théorique t de sphères en fonction de leur diamètre d , pour une chute libre de (0-892) cm (Sphères de même densité que les grains étudiés et dans les mêmes conditions atmosphériques que celles des essais sur grains).
- II.- Courbe $f(\delta t)$ donnant le temps de passage théorique δt pour ces sphères sur la base de mesure, entre 892 cm et 941,85 cm. (Dans les mêmes conditions que précédemment).

Ayant, pour chaque grain, mesuré expérimentalement le temps de passage δt on peut, au moyen de la IIème courbe, déterminer le diamètre d d'une sphère équivalente. Pour les 100 grains on détermine les diamètres équivalents, la courbe de dispersion et les diamètres extrêmes $d_{\min}$ et $d_{\max}$.

La première courbe nous donne alors les temps de chute libre de ces sphères équivalentes et l'écart Δt_i correspondant aux diamètres extrêmes on peut dire que Δt_i correspond aussi à l'écart extrême entre les temps de chute des 100 grains tombant isolément.

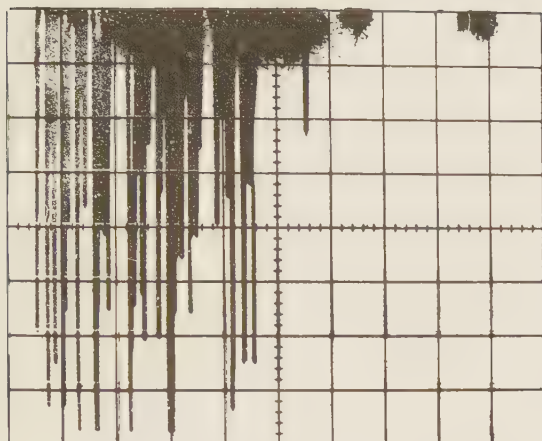
Quand les 100 grains tombent en essaim, on mesure à l'oscilloscope un écart de temps Δt_e . Il est naturel de comparer Δt_i et Δt_e .

En utilisant le système de lâchage en essaim conçu pour 100 grains, nous avons laissé tomber 100 grains pour chaque classe de tamisage. Les photos des inscriptions obtenues sur l'écran de l'oscilloscope à mémoire sont présentées sur les figures (30 - 31 - 32 - 33 - 34). La différence de durée entre la première et la dernière inscription correspond à l'écart de temps Δt_e .

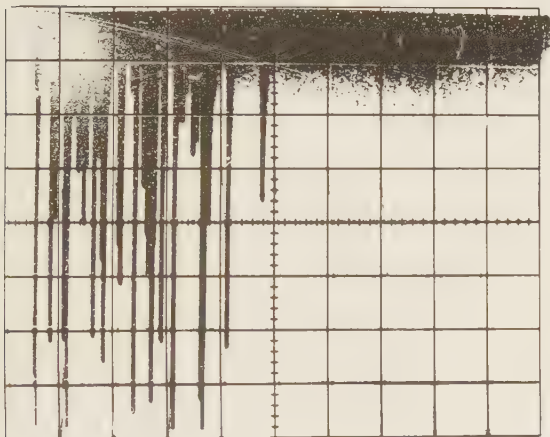
Les figures (35 - 36 - 37 - 38 - 39) représentent les courbes $f(t)$ et $f(\delta t)$ ainsi que les diamètres des sphères équivalentes aux grains isolés et en essaim. Ces diamètres, c'est-à-dire les valeurs $d_{\max}$ et $d_{\min}$ valables pour chaque tamis peuvent être utiles pour la construction des machines de triage de grains, elles permettent de déterminer leurs caractéristiques techniques.

C A P I T O L E

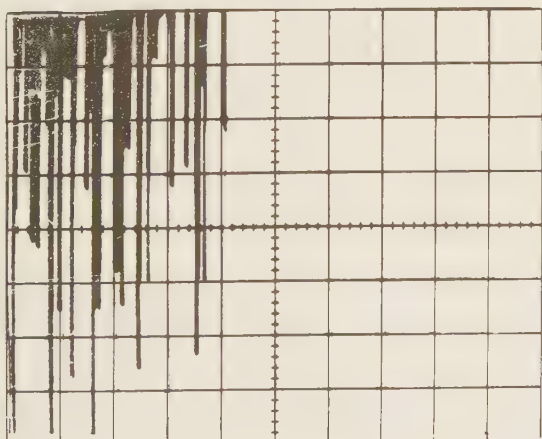
Nombre : 100 grains



Tamis : $\emptyset$ 4 mm
 Balayage : 35 ms/div
 Amplitude : 0,5 V/div
 Intervalle de dispersion : 175 ms



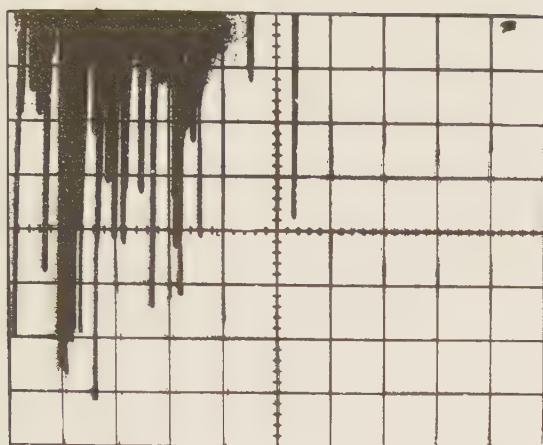
Tamis : $\emptyset$ 3,5 mm
 Balayage : 35 ms/div
 Amplitude : 0,5 V/div
 Intervalle de dispersion : 150,5 ms



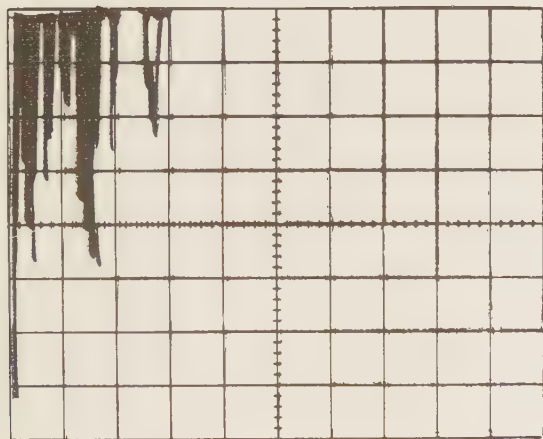
Tamis : $\emptyset$ 3,15 mm
 Balayage : 35 ms/div
 Amplitude : 0,5 V/div
 Intervalle de dispersion : 136,5 ms

P R O G R E S S

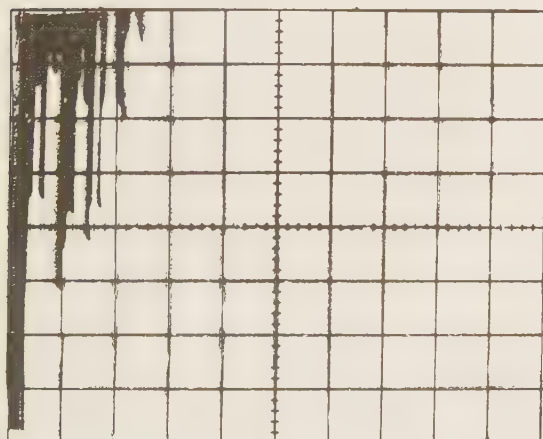
Nombre : 100 grains



Tamis : $\emptyset$ 3,5 mm
 Balayage : 35 ms/div
 Amplitude : 0,5 V/div
 Intervalle de dispersion : 182 ms



Tamis : $\emptyset$ 3,15 mm
 Balayage : 35 ms/div
 Amplitude : 0,5 V/div
 Intervalle de dispersion : 98 ms

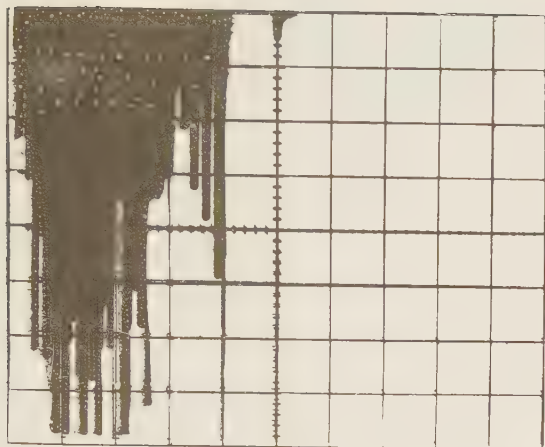


Tamis : $\emptyset$ 3 mm
 Balayage : 35 ms/div
 Amplitude : 0,5 V/div
 Intervalle de dispersion : 77 ms

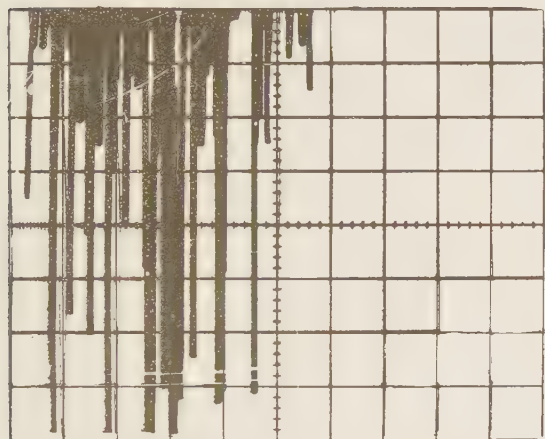
Fig. 31

MOISSON

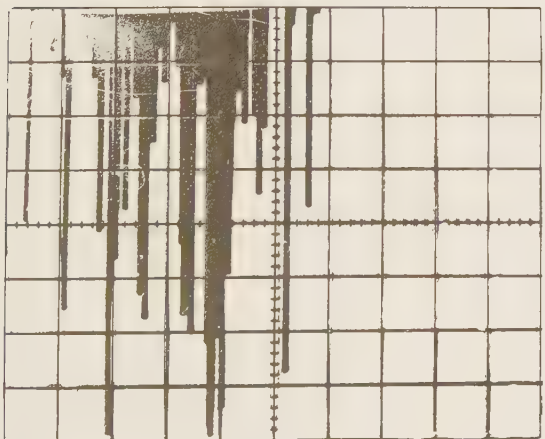
Nombre : 100 grains



Tamis : $\emptyset$ 4 mm
Balayage : 35 ms/div
Amplitude : 0,5 V/div
Intervalle de dispersion : 175 ms



Tamis : $\emptyset$ 3,5 mm
Balayage : 35 ms/div
Amplitude : 0,5 V/div
Intervalle de dispersion : 182 ms

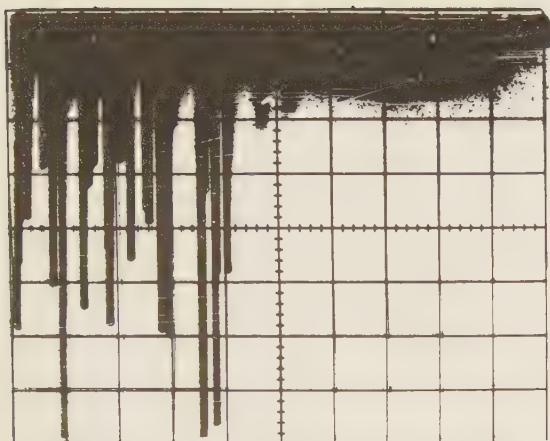


Tamis : $\emptyset$ 3,15 mm
Balayage : 35 ms/div
Amplitude : 0,5 V/div
Intervalle de dispersion : 182 ms

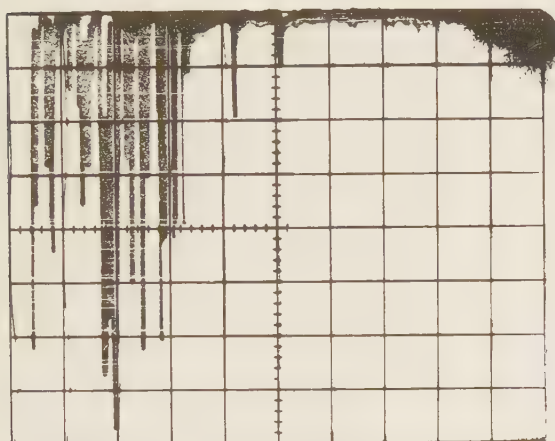
Fig. 32

R E X

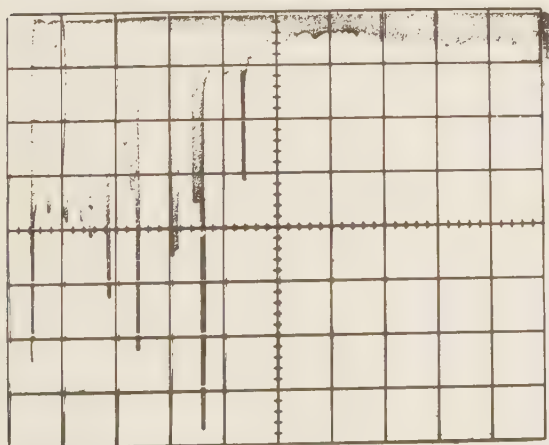
Nombre : 100 grains



Tamis : $\emptyset$ 3,5 mm
 Balayage : 35 ms/div
 Amplitude : 0,5 V/div
 Intervalle de dispersion : 182 ms



Tamis : $\emptyset$ 3,15 mm
 Balayage : 35 ms/div
 Amplitude : 0,5 V/div
 Intervalle de dispersion : 161 ms

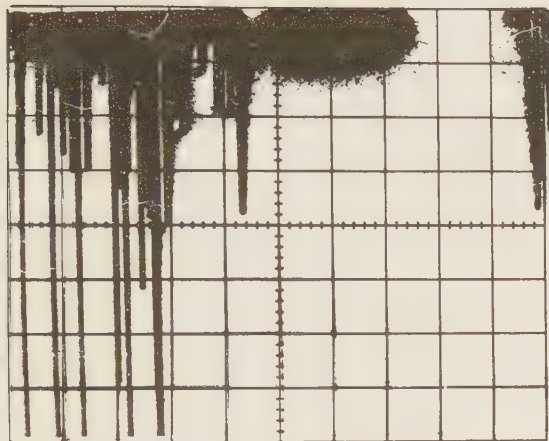


Tamis : $\emptyset$ 3 mm
 Balayage : 35 ms/div
 Amplitude : 0,5 V/div
 Intervalle de dispersion : 140 ms

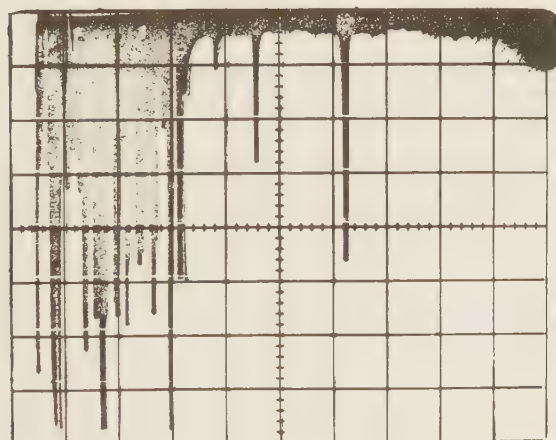
Fig. 33

T O P A Z E

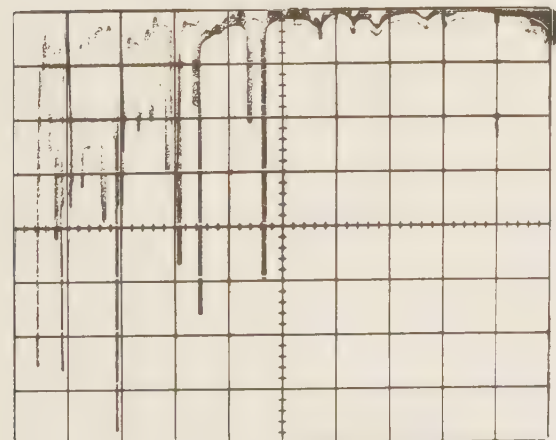
Nombre : 100 grains



Tamis : $\emptyset$ 4 mm
 Balayage : 20 ms/div
 Amplitude : 0,5 V/div
 Intervalle de dispersion : 200 ms



Tamis : $\emptyset$ 3,5 mm
 Balayage : 35 ms/div
 Amplitude : 0,5 V/div
 Intervalle de dispersion : 203 ms



Tamis : $\emptyset$ 3,15 mm
 Balayage : 35 ms/div
 Amplitude : 0,5 V/div
 Intervalle de dispersion : 150 ms

Fig. 34

Les résultats obtenus à partir des figures (30 - 34) permettent de constater que les différences des temps de passage entre le premier et le dernier grain d'une part dans le cas de grains tombant isolément et d'autre part dans le cas de grains tombant en essaim, présentent un intervalle de dispersion qui s'avère si on les compare être inférieur, presque égal et supérieur dans l'ordre croissant des calibres. Nous avons figuré d'autres courbes afin de pouvoir étudier les diamètres des sphères équivalentes aux grains soit isolés, soit en essaim. La figure (40) représente ce résultat. Ces diamètres obtenus pour des essais isolés sont équivalents à ceux des grains en essaim pour un seul tamis de chacune des trois variétés à savoir : tamis de 3,5 pour la variété CAPITOLE, tamis de 3,15 pour la variété REX, tamis de 3,5 pour la variété TOPAZE.

D.- APPAREILS UTILISES

I.- Fréquence-mètre - chronomètre - périodemètre "Rochar A. 1213" à affichage et normalisateur chronométrique à seuils "Rochar 1214".

Une des fonctions "A-B" de cet appareil permet la mesure des intervalles de temps en unité d'une microseconde, de 5 μ s et jusqu'à 10 jours, à partir de signaux chronométriques préalablement mis en forme par un autre appareil associé, le normalisateur chronométrique qui délivre des signaux normalisés en fonction "chronomètre A-B" à partir de signaux de forme quelconque.

A partir d'un signal quelconque ayant une crête de 300 mv environ au minimum, le normalisateur délivre au chronomètre une impulsion de commande positive de 5 à 8 volts à front abrupt qui lui est nécessaire pour son fonctionnement. Cette forme d'impulsion permet d'obtenir un déclenchement très précis.

Une première impulsion A (start) supérieure à 300 mv crête, envoyée au normalisateur, déclenche le comptage du chronomètre.

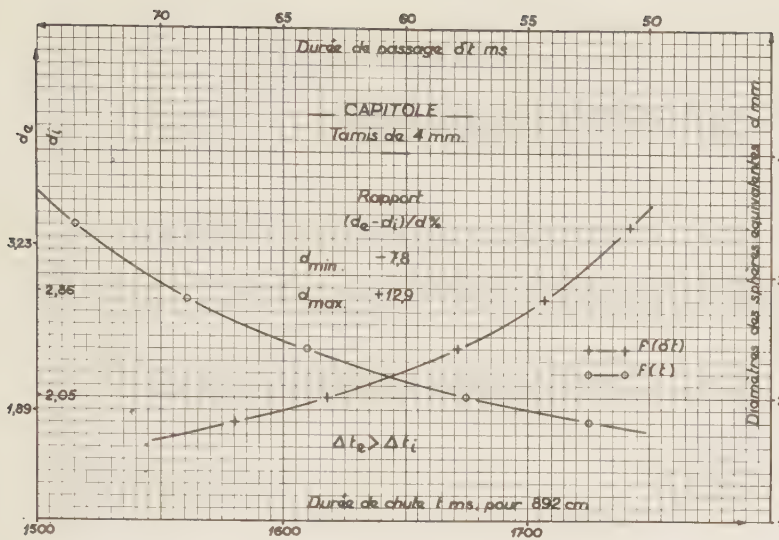
Une deuxième impulsion B (stop) toujours supérieur à 300 mv crête, arrête le comptage du chronomètre.

Les deux impulsions successives transmises au chronomètre sont identiques :

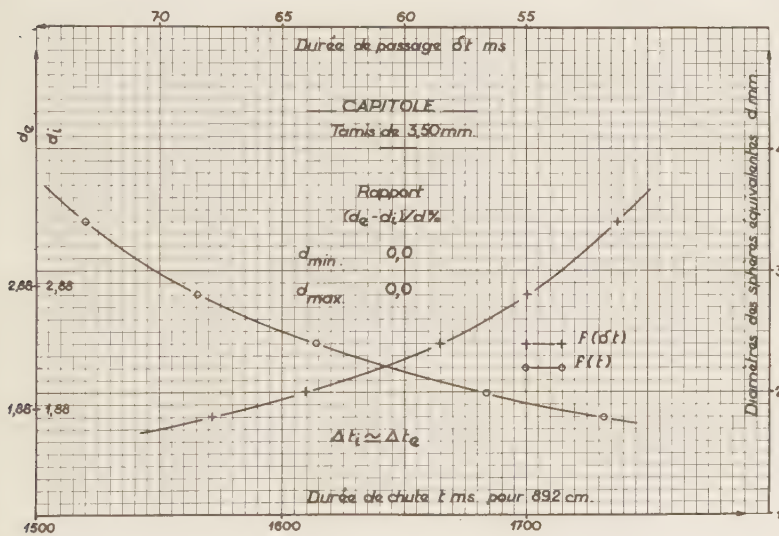
A la sortie du normalisateur :

Amplitude $\neq$ 6 v : largeur $\leq$ 0,6 μ s ;

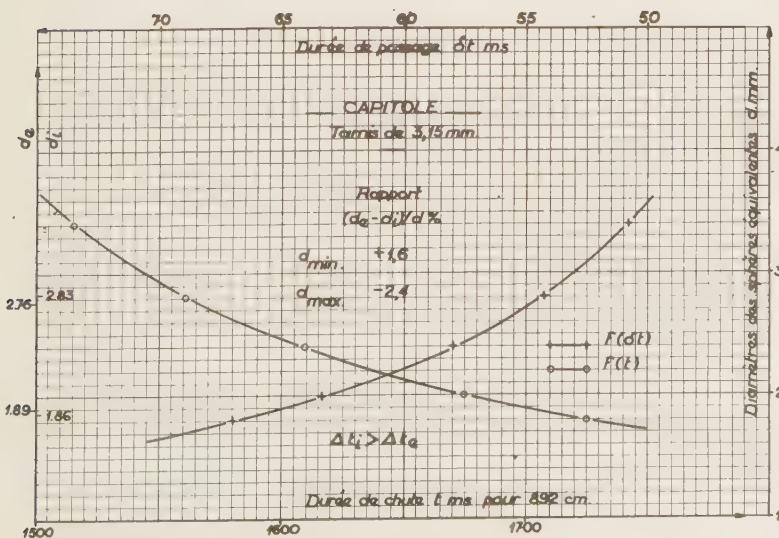
temps de montée $\leq$ 0,08 μ s



ISOLES		EN ESSAIM	
$d_{\min}$	: 2,05	1,89 (mm)	
$d_{\max}$	: 2,86	3,23 (mm)	
$\delta t_{\min}$	: 54042	- (μs)	
$\delta t_{\max}$	: 63282	- (μs)	
$t_{\min}$	: 1557	1528 (ms)	
$t_{\max}$	: 1674	1703 (ms)	
Δt	: 117	175 (ms)	



$d_{\min}$	: 1,88	1,88 (mm)	
$d_{\max}$	: 2,88	2,88 (mm)	
$\delta t_{\min}$	: 54354	- (μs)	
$\delta t_{\max}$	: 66240	- (μs)	
$t_{\min}$	: 1560	1560 (ms)	
$t_{\max}$	: 1709	1710 (ms)	
Δt	: 149	150 (ms)	

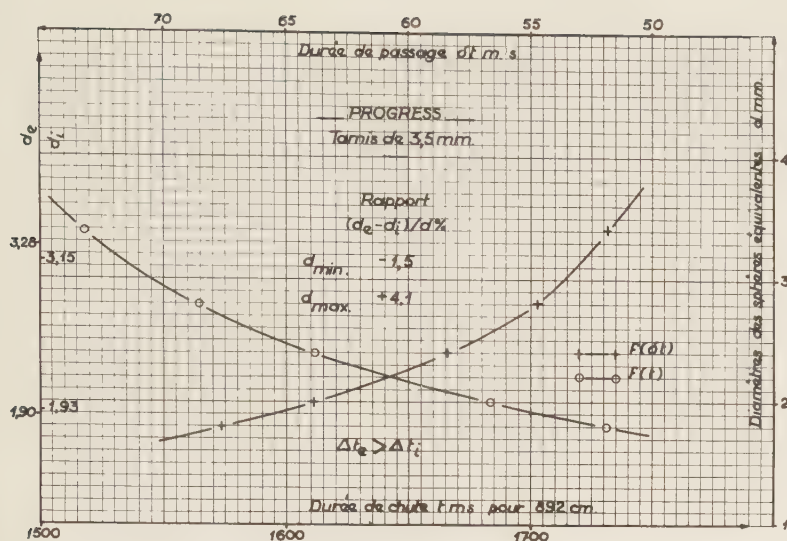


$d_{\min}$	: 1,86	1,89 (mm)	
$d_{\max}$	: 2,83	2,76 (mm)	
$\delta t_{\min}$	: 54211	- (μs)	
$\delta t_{\max}$	: 65761	- (μs)	
$t_{\min}$	: 1559	1567 (ms)	
$t_{\max}$	: 1711	1703 (ms)	
Δt	: 152	136 (ms)	

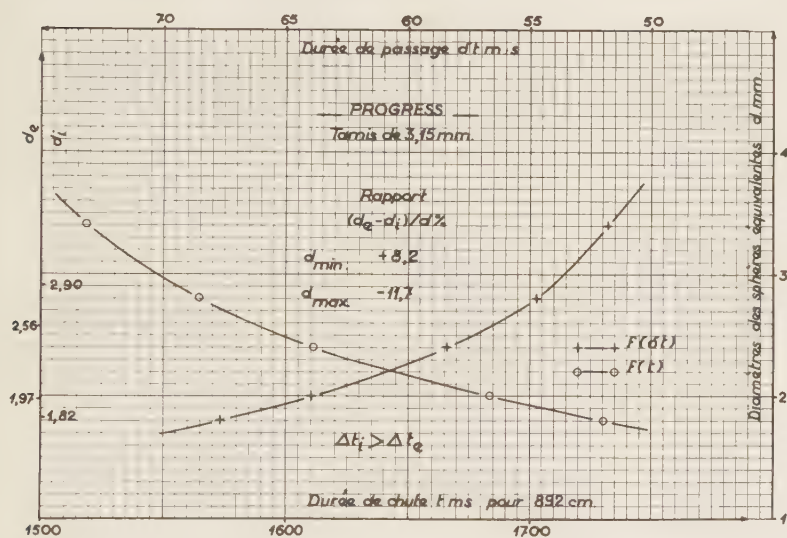
d : diamètres des sphères équivalentes ayant même durée de chute

Fig. 35

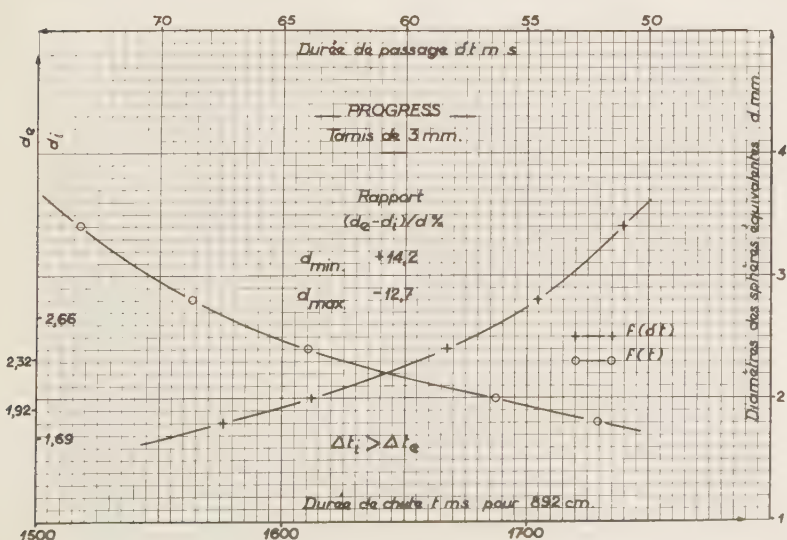
ISOLES EN ESSAIM



$d_{\min}$	: 1,93	1,90 (mm)
$d_{\max}$	: 3,15	3,28 (mm)
$\delta t_{\min}$	: 52965	- (μs)
$\delta t_{\max}$	: 65162	- (μs)
$t_{\min}$	: 1535	1526 (ms)
$t_{\max}$	: 1700	1708 (ms)
Δt	: 165	182 (ms)



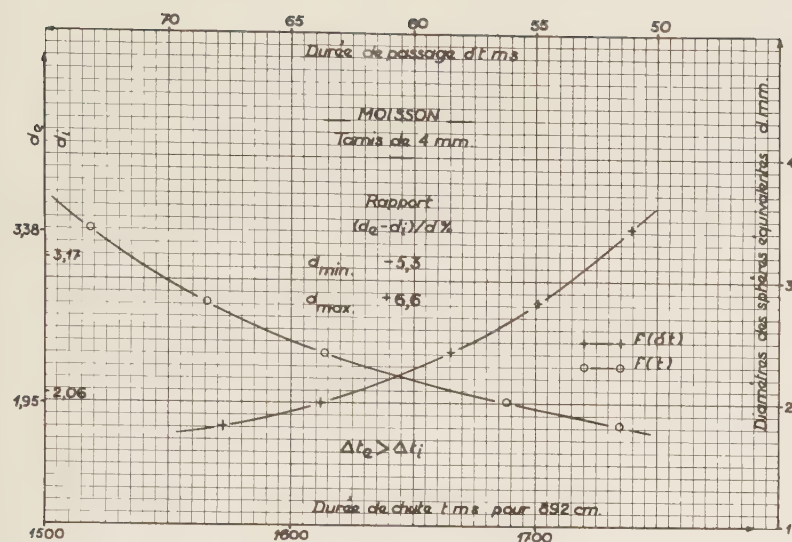
$d_{\min}$	: 1,82	1,97 (mm)
$d_{\max}$	: 2,90	2,56 (mm)
$\delta t_{\min}$	: 54237	- (μs)
$\delta t_{\max}$	: 67390	- (μs)
$t_{\min}$	: 1556	1592 (ms)
$t_{\max}$	: 1727	1690 (ms)
Δt	: 171	98 (ms)



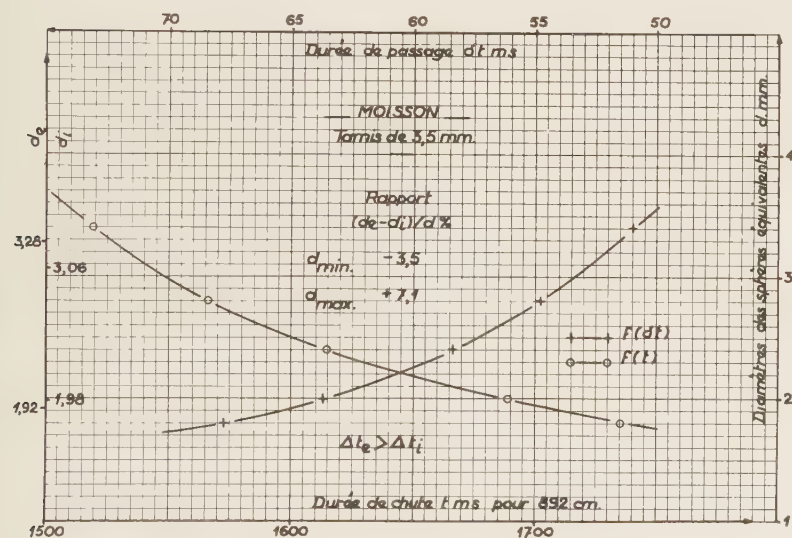
$d_{\min}$	: 1,69	1,92 (mm)
$d_{\max}$	: 2,66	2,32 (mm)
$\delta t_{\min}$	: 55781	- (μs)
$\delta t_{\max}$	: 69682	- (μs)
$t_{\min}$	: 1578	1625 (ms)
$t_{\max}$	: 1750	1702 (ms)
Δt	: 172	77 (ms)

d : Diamètres des sphères équivalentes ayant même durée de chute.

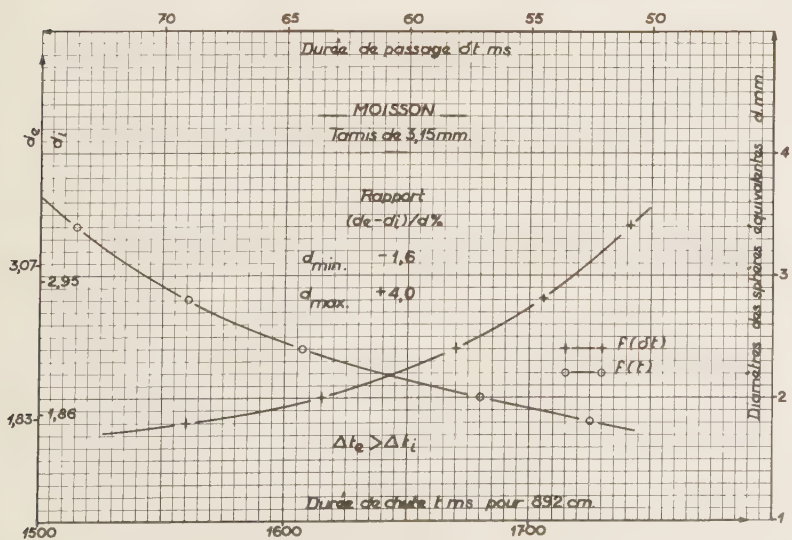
Fig. 36



ISOLES	EN ESSAIM
d_{min} :	2,06 1,95 (mm)
d_{max} :	3,17 3,38 (mm)
δt_{min} :	52565 - (μs)
δt_{max} :	62837 - (μs)
t_{min} :	1535 1520 (ms)
t_{max} :	1680 1695 (ms)
Δt :	145 175 (ms)



d_{min} :	1,98 1,92 (mm)
d_{max} :	3,06 3,28 (mm)
δt_{min} :	53124 - (μs)
δt_{max} :	63954 - (μs)
t_{min} :	1544 1528 (ms)
t_{max} :	1693 1710 (ms)
Δt :	149 182 (ms)

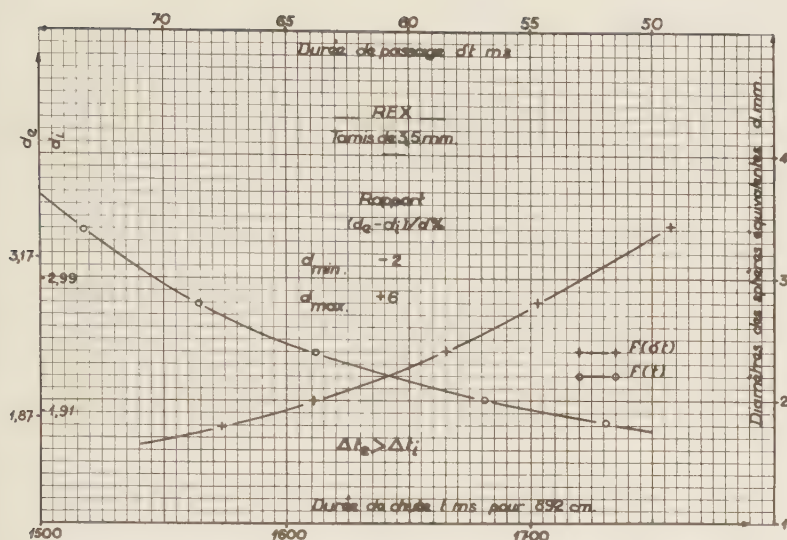


d_{min} :	1,86 1,83 (mm)
d_{max} :	2,95 3,07 (mm)
δt_{min} :	53592 - (μs)
δt_{max} :	66812 - (μs)
t_{min} :	1548 1538 (ms)
t_{max} :	1710 1720 (ms)
Δt :	162 182 (ms)

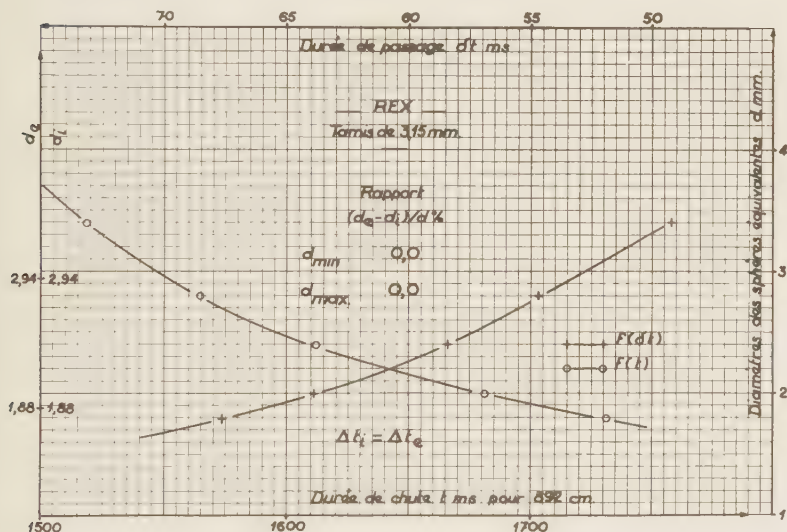
d : Diamètres des sphères équivalentes ayant même durée de chute.

Fig. 37

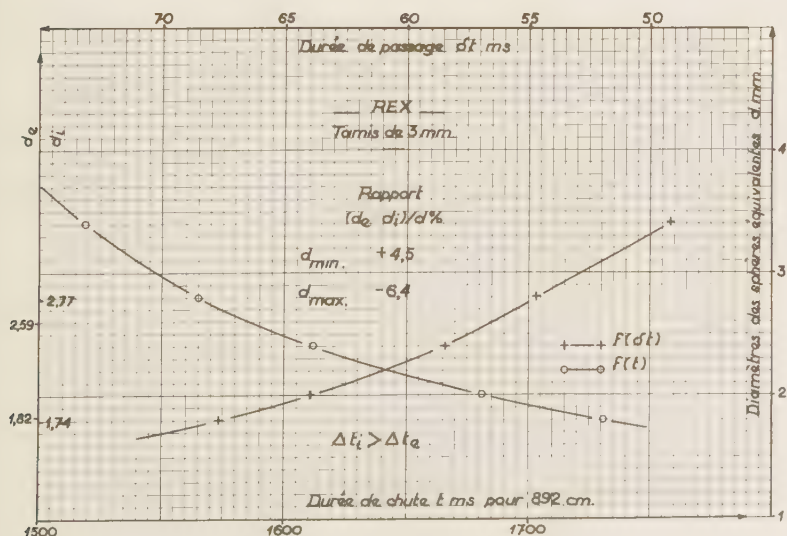
ISOLES EN ESSAIM



d_{min}	:	1,91	1,87 (mm)
d_{max}	:	2,99	3,17 (mm)
δt_{min}	:	53054	- (μs)
δt_{max}	:	65293	- (μs)
t_{min}	:	1548	1535 (ms)
t_{max}	:	1705	1717 (ms)
Δt	:	157	182 (ms)



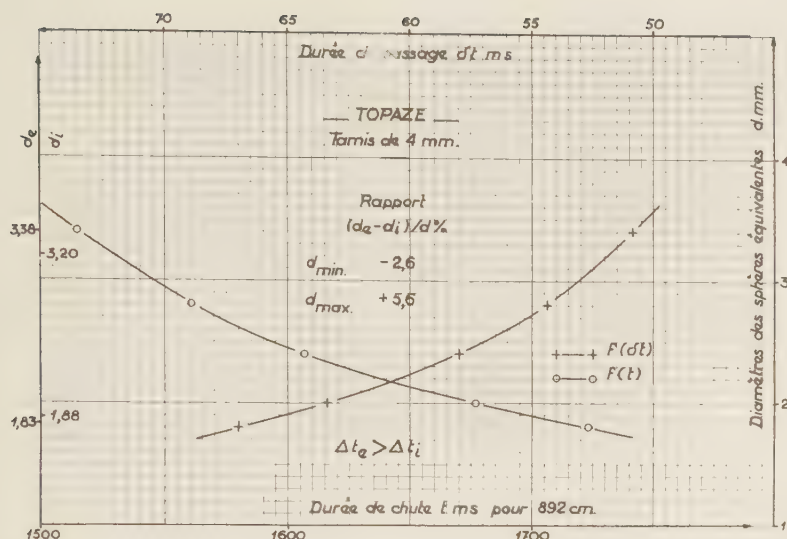
d_{min}	:	1,88	1,88 (mm)
d_{max}	:	2,94	2,94 (mm)
δt_{min}	:	53418	- (μs)
δt_{max}	:	65805	- (μs)
t_{min}	:	1553	1552 (ms)
t_{max}	:	1712	1713 (ms)
Δt	:	159	161 (ms)



d_{min}	:	1,74	1,82 (mm)
d_{max}	:	2,77	2,59 (mm)
δt_{min}	:	54945	- (μs)
δt_{max}	:	68872	- (μs)
t_{min}	:	1568	1587 (ms)
t_{max}	:	1746	1727 (ms)
Δt	:	178	140 (ms)

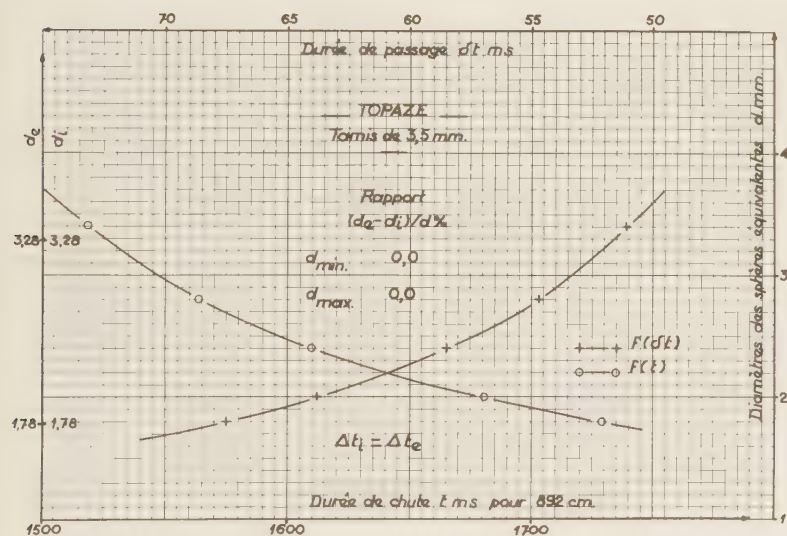
d : Diamètres des sphères équivalentes ayant même durée de chute.

Fig. 38

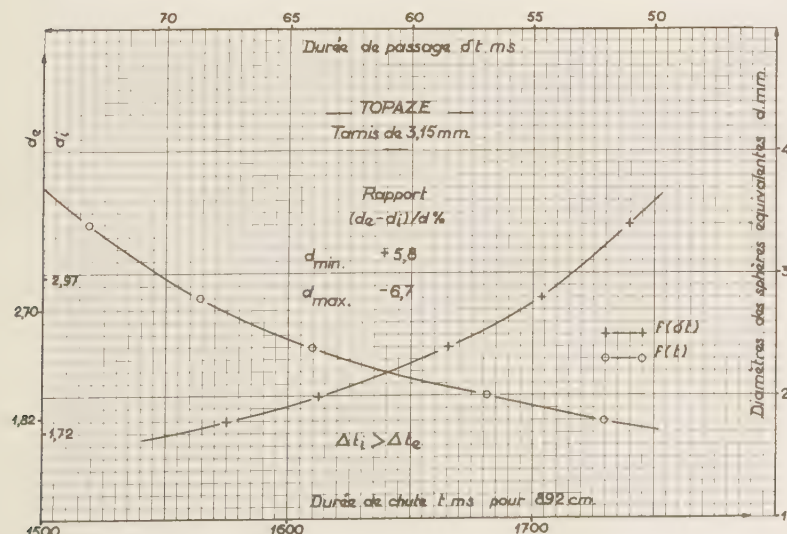


ISOLES EN ESSAIM

d_{min}	: 1,88	1,83 (mm)
d_{max}	: 3,20	3,38 (mm)
δt_{min}	: 52008	- (μs)
δt_{max}	: 65559	- (μs)
t_{min}	: 1530	1516 (ms)
t_{max}	: 1703	1716 (ms)
Δt	: 173	200 (ms)



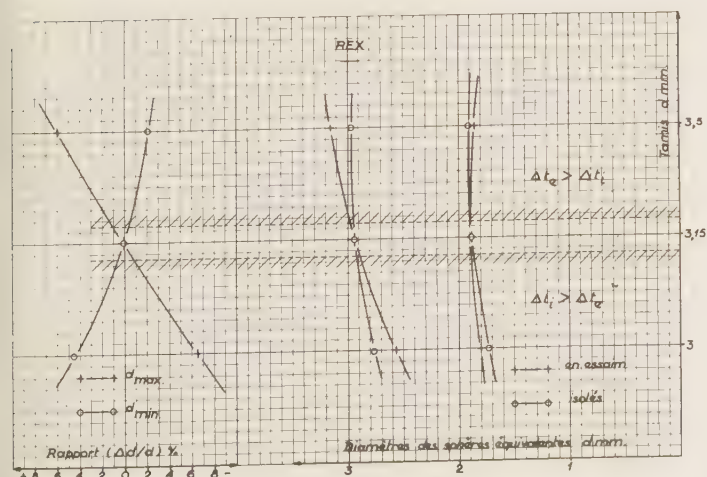
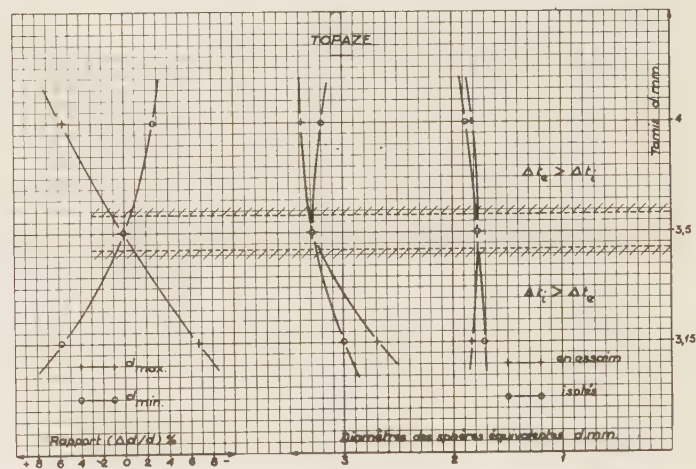
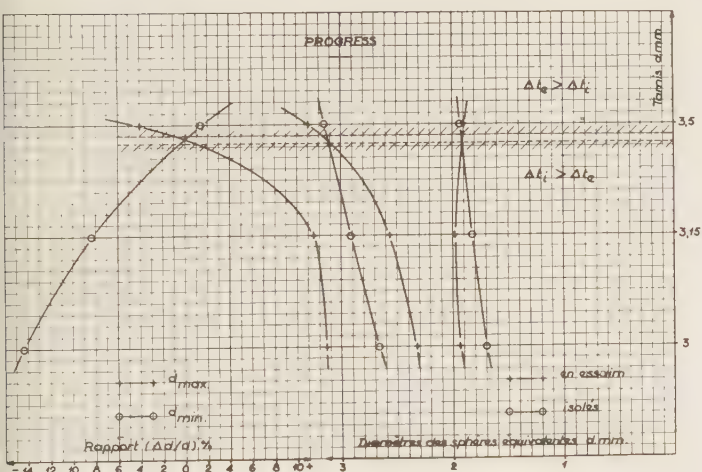
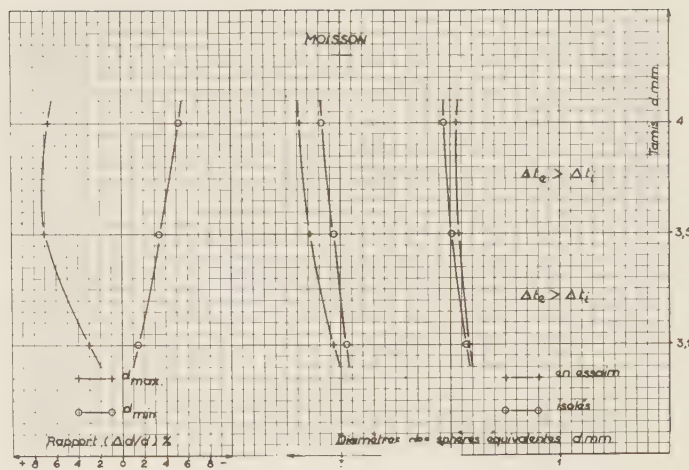
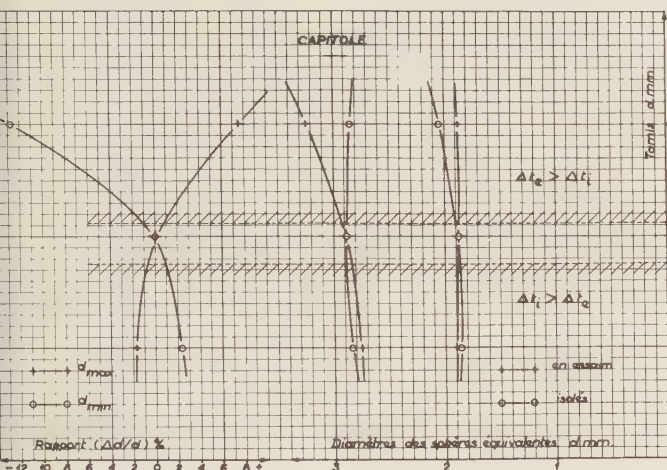
d_{min}	: 1,78	1,78 (mm)
d_{max}	: 3,28	3,28 (mm)
δt_{min}	: 51758	- (μs)
δt_{max}	: 67832	- (μs)
t_{min}	: 1527	1528 (ms)
t_{max}	: 1732	1731 (ms)
Δt	: 205	203 (ms)



d_{min}	: 1,72	1,82 (mm)
d_{max}	: 2,97	2,70 (mm)
δt_{min}	: 53555	- (μs)
δt_{max}	: 69213	- (μs)
t_{min}	: 1551	1575 (ms)
t_{max}	: 1750	1725 (ms)
Δt	: 199	150 (ms)

d : Diamètres des sphères équivalentes ayant même durée de chute.

Fig. 39



Comparaison des temps d'entrée
dans le faisceau lumineux pour
les valeurs concernant des
grains isolés et en essaim

Fig. 40

Dans le chronomètre : vitesse de montée ≥ 50 v/ μ s

Alimentation (115-220) v_~ : 50/60 Hz < 30 VA.

La précision du groupe de "*normalisateur - chronomètre*" est largement suffisante pour nos calculs. Le temps d'inertie est de moins de 0,6 μ s sur une mesure de 50000 μ s minimum soit une erreur de l'ordre de 1×10^{-7} largement inférieur à notre erreur de mesure.

II.- Amplificateur à courant continu "*Rochar A. 1338*". Alimentation (115-220 V) : 50 à 400 Hz ; 5 VA. Gain 20 à 1000. Temps de réponse < 25 μ s en signaux carrés.

L'amplificateur introduit également une erreur, le temps de réponse maximum est de 25 μ s sur 50.000 μ s minimum soit une erreur de $0,5 \times 10^{-3}$ qui paraît aussi suffisante. S'il s'agit des essais de grains en essaim, cette erreur ne peut atteindre seulement que $1,5 \times 10^{-4}$, car la durée minimum entre le premier et le dernier grain dans les essais en essaim est de l'ordre de 150 ms.

III.- Photodiodes à jonction pn au germanium "*p H G 1 Cosem*".

IV.- Oscilloscope à mémoire "*TEKTRONIX Type 564*" (U.S.A.)

Cet appareil est destiné à conserver l'image sur l'écran pendant une heure après son inscription pour étudier ou la photographier.

Alimentation : 105 à 125 V / 210 à 225 V ; 50 Hz ; 250 Watts

Voltage d'entrée : 0,2 mV à 100 V crête à crête

Amplitude d'entrée : 0,1 V

Temps de montée : ≤ 5 μ s

Cet appareil a été utilisé pour photographier l'inscription des traits provoqués par l'arrivée des essaims de grains dans le faisceau lumineux. En tenant compte de la différence des temps extrêmes qui est de l'ordre de 150 ms minimum, une précision 5/150000, soit $0,33 \cdot 10^{-4}$, largement inférieure à celle du système de lâchage en essaim qui est de l'ordre de 3,5 %. Donc, l'erreur des essais en essaim peut être considérée comme l'erreur principale du système de lâchage indépendamment de celle des appareils.

V.- Pour les mesures de poids nous avons utilisé une balance de précision METTLER ayant une graduation de 0,01 gr.

VI.- Les mesures des dimensions des grains ont été faites par un pied à coulisse ayant une précision de 0,05 mm et sur une vingtaine de grains de chaque tamis.

VII.- La pression barométrique était lue sur un baromètre à colonne de mercure type météorologique et corrigée en fonction de la température.

L'état de l'air était déterminé grâce à un psychromètre à aspiration du type HAENNI.

VIII.- Pycnomètre Beckman

Pour la mesure des densités des grains nous avons utilisé le pycnomètre Beckman à compression d'air ; il comprend deux chambres cylindriques reliées par un tube pourvu d'un robinet. Dans chaque cylindre se meut un piston, dont l'un est destiné à la compression de la chambre de mesure et l'autre à celle d'un volume d'air de références. Les deux chambres sont reliées chacune à une extrémité d'un manomètre différentiel.

Quand le robinet de couplage est fermé, tout changement dans la position d'un des pistons doit, si l'on veut que le manomètre différentiel reste à zéro, être accompagné d'une modification dans la position de l'autre piston, la différence des déplacements donne le volume de l'échantillon.

La mesure est rapide et a une précision meilleur que $\pm 0,1$ CC, cette précision a été augmentée par la répétition de chaque mesure.

IX.- Tous les calculs sont faits par un calculateur électronique "OLIVETTI PROGRAMMA 101".

E.- CONCLUSIONS

- I.- Un système de mesure électronique a été mis au point qui permet avec une grande précision l'étude de la chute libre d'un corps isolé quel qu'il soit dans un tuyau d'un diamètre de 300 mm. Ce système est basé sur la mesure de la durée de passage entre deux niveaux déterminés. En tout état de cause l'erreur de mesure ne dépasse pas 1 %.
- II.- Ce système a été adapté avec précision à l'étude de corps chutant de façon isolée ou en essaim (au nombre de 100 au maximum).
- III.- D'après les résultats concernant des grains isolés la dispersion de leurs vitesses limites a été donnée pour chaque classe de calibrage de chacune des cinq variétés de blé de semence.
- IV.- En réalisant des essais en essaim pour les différents types de billes dont nous disposions on a pu étudier leurs séparation au bout d'une chute de 892 cm.
- V.- Calculs de l'interaction aérodynamique de grains en essaim.
- VI.- Diamètres équivalents d'un grain de blé : les calculs théoriques effectués pour les billes fictives ayant la même durée de chute et la même masse volumique que les grains chutant de façon isolée ou en essaim ont permis de déterminer les diamètres sphériques correspondant aux grains. Ces diamètres pourraient être utiles aux constructeurs des machines de triage afin de pouvoir préciser leurs caractéristiques techniques.
- VII.- On a pu constater également que les diamètres des sphères équivalentes correspondant à des essais isolés étaient utilisables dans le cas de grains en essaim pour une classe de tamisage et quelques variétés des grains.

P I B L I O G R A P H I E

-oOo-

- (1) A. FORTIER, Mécanique des Suspensions,
Masson, PARIS 1967.
- (2) R. COMOLET, Mécanique Expérimentale des Fluides,
Masson, PARIS 1963.
- (3) H.A. FUCHS, The Mechanics of Aerosols (traduit du Russe),
Pergamon, LONDON 1964.
- (4) M.A. DEMENTIEV, "*L'étude des Propriétés Aérodynamiques
des graines*" (en Russe) ; la théorie,
la réalisation et la construction des
Machines Agricoles - Tome II, p. 148
à 180, MOSCOU 1936.
- (5) R. COMOLET, Introduction à l'analyse dimensionnelle et
aux problèmes de similitude,
Masson, PARIS 1958.
- (6) K. SNEDD, "*Resistance of grains and Seeds to air flow*",
Agricultural Engineering, Vol. 34,
MICHIGAN, U.S.A. 1953.
- (7) J. VALENBOIS, Memento d'Hydraulique Pratique,
Eyrolles, PARIS 1961.
- (8) M. MILNER, E.P. FARREL and KATZ, "*The Projection Princi-
ple Applied to grain Seperation*",
contribution n° 255 présentée au 3ème
Congrès Inter. de Pain, HAMBOURG 1955.

- (9) G. ACKERMANN, *"Trennung von Weizen und Skabiose im senkrechten Luftstrom"*, Landtechnische Forschung n° 3, MÜNCHEN 1955.
- (10) W.K. BILANSKI, S.E. COLLINS, and P. CHU, *"Aerodynamic Properties of Seed Grains"*, Agricultural Engineering, p. 216, MICHIGAN, U.S.A. 1962.
- (11) G. WELSCHOF, *"Pneumatische Förderung bei grossen Fördergutkonzentrationen"*, V.D.I. - Forschungsheft, DÜSSELDORF 1962.
- (12) L.E. OSBORNE, *"Resistance to Airflow of grain and other Seeds"*, Journal of Agricultural Engineering Research n° 6, SILSOE 1961.
- (13) K. KPOMBHOLZ, *"Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit von Getreidestroh-Häckselteilchen durch Fallzeitmessung"*, Archiv für Landtechnik, vol. n° 1, AKADEMIE-VERLAG-BERLIN 1965.
- (14) P.J. LAWTON, *"Resistance to Air Flow of some common Seeds"*, Journal of Agricultural Engineering Research, vol. 19, n° 4, SILSOE 1965.
- (15) W.K. BILANSKI and B. LAL, *"Behavior of Threshed Materials in a vertical Wind Tunnel"*, Transaction of the ASAE, p. 411, MICHIGAN, U.S.A. 1965.
- (16) J.E. HARMOND, N.R. BRANDENBURG and L.A. JENSEN, *"Physical Properties of Seed"*, Transactions of the ASAE, vol. 8, n° 1, MICHIGAN, U.S.A. 1965.
- (17) Nuri N. MOUSENIN, *"Physical Properties of Agricultural Products"*, Transactions of the ASAE, Vol. 8, n° 1, MICHIGAN, U.S.A. 1965.

- (18) C.K. SHEDD, *"Some New Data on Resistance of grains to Air Flow"*, Agricultural Eng., vol. 32, MICHIGAN, U.S.A. 1951.
- (19) W. BARTHE, *"Moyens et Possibilités pour la séparation des brouillards liquides et des gouttes de liquide dans le gaz"* (texte traduit de l'Allemand), Institut Français des COMBUSTIBLES et de l'ENERGIE, PARIS 1959.
- (20) H. KECK and J.R. GOSS, *"Determining Aerodynamic Drag and Terminal Velocities of Agronomic Seeds in Free Fall"*, Transactions of the ASAE, p. 553, MICHIGAN, U.S.A. 1965.
- (21) R.E. GARPETT and D.B. BROOKER, *"Aerodynamic Drag of Farm grains"*, Transaction of the ASAE, p. 49, MICHIGAN, U.S.A. 1965.
- (22) J.B. UEL and B.J. LAMP, *"Pneumatic Separation of grain and Straw Mixtures"*, Transaction of the ASAE, p. 244, MICHIGAN, U.S.A. 1966.
- (23) W. SCHEUB, *"Sélection Electronique de graines Alimentaires"*, (texte traduit de l'anglais), Industrial Electronics, LONDRE 1965.
- (24) S.S. CHKLAROV, *"Sur l'utilisation du champ Electrostatique pour le nettoyage des graines par courants d'air"*, (en Russe), Les tracteurs et Machines Agricoles, p. 28, U.R.S.S. 1966.
- (25) C.F. KIKER and I.J. ROSS, *"An equation of motion for multiple granular Particles in Free Fall in Enclosed Vertical Ducts"*, Transactions of the ASAE, p. 468, MICHIGAN, U.S.A. 1966.
- (26) G.C. ZOEBB, *"Instrumentation and Measurement Techniques for Determining Physical Properties of Farm Products"*, Transactions of the ASAE, p. 100, MICHIGAN, U.S.A. 1967.

- (27) A.L. HAWK, D.B. BROOKER and J.J. CASSIDY, *"Aerodynamic characteristics of selected Farm Grains"*, Transactions of the ASAE, P. 48, MICHIGAN, U.S.A. 1966.
- (28) A.I. KOFOBEINIKOV, *"L'influence de la résistance de l'air sur la distribution régulière des graines de betteraves"*, (en Russe), Mécanisation et Electrification de l'Economie Agricole Socialiste, n° 6, U.R.S.S. 1967.
- (29) B.A. MUELLER, D.B. BROOKER and J.J. CASSIDY, *"Aerodynamic Properties of Black Walnuts : Application in Separating Good from Bad Walnuts"*, Transaction of the ASAE, p. 57, MICHIGAN, U.S.A. 1967.
- (30) S. PERSSON, *"Eigenschaften des Reinigungsgutes in Mäh-dreschern"*, Landtechnische Forschung Heft 2, p. 41, MÜNCHEN 1957.
- (31) S. PERSSON, *"Die günstigsten Kombinationen der Faktoren beim Windsortieren, eine Mathematische Studie"*, Landtechnische Forschung Heft 2, p. 53, MÜNCHEN 1967.
- (32) C. Von ZABELTITZ, *"Gleichungen für Widerstandsbeiwerte zur Berechnung der Strömungswiderstände von kugeln und Schütttschichten"*, Grundlagen der Landtechnik, n° 4, P. 148, BRUNSWICK 1967.
- (33) B. QUEENEL, Cours d'Hydraulique Fluviale, Tome I, p. 24, Edition RIBER, PARIS 1964.
- (34) C. ÖZGÜR, Deneysel Hidromekanik, I.T.Ü. Kütüphanesi Sayı : 660, ISTANBUL 1966.
- (35) W. MATZ, Le principe de similitude en Génie chimique, [traduit de l'Allemand], DUNOD, PARIS 1959.

- (36) G. SEGLER, Pneumatic grain conveying (Traduit de l'Allemand), National Institute of Agricultural Engineering, BRUNSWICK 1951.
- (37) P. REBOUX, Phénomènes de Fluidisation, Association Française de Fluidisation, PARIS 1954.
- (38) R.W. WHITNEY and J.G. PORTERFIELD, *"Particle separation in a Pneumatic Conveying System"*, Transactions of the ASAE, p. 477, MICHIGAN, U.S.A. 1968.
- (39) K. KROMPHOLZ, *"Solutions approchées pour le calcul des trajectoires avec résistance de l'air"*, (Traduit de l'Allemand), KDT, Deutsche Agrartechnik, BERLIN 1968.
- (40) R. WASMUND, *"Grundsätzliches zur Trockenabscheidung von Feststoffteilchen aus Abluftströmen der landwirtschaftlichen Technik"*, Grundlagen der Landtechnik, n° 6, p. 215, DÜSSELDORF 1968.

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté

*"Transmission hydrostatique et relevage hydraulique
appliquées aux tracteurs et machines agricoles."*

-oOo-

Vu et approuvé

Paris, le 9 Juillet 1969

Le Doyen de la Faculté des Sciences
de PARIS

Vu
et permis d'imprimer
Le Recteur de l'Académie de
PARIS

Marc. ZAMANSKY

Jean ROCHE

